

A green arrow pointing to the right, positioned to the left of the title.

# Projet ATI2

# PAVATEX

Optimisation du mélangeur  
et de la presse de la ligne  
pilote

Rapport final

Levérone Pauline

Elghani Ayoub

Bouhaddioui Ayoub

Simó Vesperinas Alejandro

Tuteur académique : Hu Guo-Hua

Tuteur industriel : Thomas Thierry

# Table des matières

Résumé.....	4
Abstract .....	5
Resum (Català).....	6
ملخص.....	7
Introduction .....	8
Partie 1 : Recherches bibliographiques .....	9
A.    Les panneaux à base de bois.....	9
1.    Fabrication .....	9
2.    Typologie.....	10
3.    Types d'adhésifs .....	10
B.    Le liant.....	12
1.    Généralités et fabrication.....	12
2.    Propriétés .....	13
C.    Le mélangeur.....	14
1.    Aspects fondamentaux du mélange de solides .....	14
2.    Mécanismes de mélange et de ségrégation.....	14
3.    Exemples de mélangeurs .....	16
4.    Choix d'un mélangeur .....	18
5.    Cas du mélangeur de la ligne pilote.....	18
D.    Phase de pressage .....	19
1.    Evolution du champ de pression lors du pressage .....	20
2.    Formation du profil de densité des panneaux lors du pressage à chaud.....	20
3.    Cas de la presse de la ligne pilote.....	22
E.    Problèmes de sécurité.....	23
1.    Les dangers du MDI .....	23
2.    Gestion des risques au niveau des machines .....	24
F.    Analyse statistique : design d'expériences .....	26
1.    Planification des expériences.....	26
2.    Plans factoriels.....	27
3.    Matrice du plan .....	27
4.    Plans factoriels fractionnaires.....	28
5.    Concept de résolution .....	28

Partie 2 : Rapport expérimental.....	30
I. Expériences sur le mélangeur .....	30
A. Modification du mélangeur actuel.....	30
1. Changement des buses de pulvérisation .....	30
2. Modification du circuit de pression .....	31
3. Expériences.....	31
B. Expérience sur l'homogénéité du mélange .....	33
1. Quantité de fibres dans le mélangeur .....	33
2. Vérification de l'homogénéité du mélange .....	34
3. Pulvérisation de monomère coloré .....	36
II. Expériences sur la presse .....	37
A. Comparaison de deux protocoles de pressage .....	37
1. Ancien protocole de pressage .....	37
2. Nouveau protocole de pressage .....	37
B. Nouveau modèle de presse.....	38
1. Modélisation 3D de la nouvelle presse sur Solidworks.....	38
2. Tenue mécanique.....	40
III. Amélioration de la sécurité de la ligne pilote.....	41
A. Vérification de la teneur de monomère dans l'air .....	41
1. Mesures de la teneur en monomère .....	41
2. Fonctionnement du détecteur.....	41
B. Amélioration de la sécurité des éléments de la ligne pilote .....	42
1. Risques mécaniques.....	42
2. Risques dus aux émissions de poussières et vapeurs de monomère.....	43
Partie 3 : Gestion de projet.....	45
A. Rappel du périmètre du projet .....	45
1. Contexte, enjeux du projet et périmètre du projet .....	45
2. L'équipe projet .....	45
3. Contraintes, limites et livrable du projet .....	46
B. Méthodes et outils déployés .....	46
1. Structure est organisation .....	46
2. Pilotage global .....	46
C. Points de vigilance solutionnés .....	47

D. Démarche globale .....	47
E. Retour d'expérience .....	47
Conclusion.....	49
Annexes .....	50
Bibliographie .....	67

## Résumé

Notre projet ATI porte sur l'amélioration de la ligne pilote de l'entreprise PAVATEX qui produit des panneaux de bois destinés au bâtiment, principalement à l'isolation thermique. Ces panneaux sont constitués de fibres de bois sèches collées à l'aide d'un liant polymère le 4,4'-diisocyanate de diphenylméthylène (MDI).

La ligne pilote est composée d'un mélangeur qui doit assurer le mélange des fibres avec le liant monomère, ainsi que d'une presse qui assure la consistance au panneau en polymérisant le monomère grâce à un système de vapeur d'eau. Cette ligne permet de tester à une échelle plus grande les innovations mises au point au sein des laboratoires avant de les lancer sur la ligne industrielle.

Le mélangeur étant plus adapté au mélange de liquide, l'objectif du projet était donc de déterminer si le mélangeur est réellement adapté au mélange de fibres. Pour cela, plusieurs expériences ont été réalisées. En premier lieu, des fibres ont été colorées avec de l'encre afin d'observer la répartition des fibres dans le mélangeur. Puis, le monomère MDI a été teinté dans le but de vérifier la bonne homogénéité du mélange de fibres et de monomère.

En ce qui concerne l'opération de pressage, une grande quantité de matière était inexploitable sur les bords des panneaux. Ces derniers présentaient donc des profils de densité qui n'étaient pas homogènes. Pour cela, nous avons tout d'abord choisi de déterminer un nouveau protocole de pressage afin de modéliser au mieux le protocole utilisé sur la ligne industrielle. Puis, étant donné l'état précaire de la presse actuelle, nous avons décidé de modéliser un nouvel outil de pressage en utilisant le logiciel SolidWorks, puis de réaliser une modélisation par éléments finis à l'aide du logiciel Ansys.

Finalement, nous nous sommes intéressés à la sécurisation de la ligne pilote, que ce soit au niveau des vapeurs toxiques du monomère ou bien par rapport aux risques liés au mélangeur et à la presse eux-mêmes (pincements, blessures, etc...).

## Abstract

Our ATI Project deals with the improvement of the pilot line of the Company PAVATEX. Who produces wooden fibreboards destined for construction, mainly for thermic isolation. This boards are constituted by dried wood fibres glued with the help of a binding polymer, the 4,4'-diisocyanate of diphenylmethylene (MDI).

The pilot line is composed by one mixer who must ensure the mixing of the fibres with the binding monomer. As well as by one press who ensures the consistence of the board polymerizing the monomer thanks to a system of water vapour. This pilot line allows the testing in a larger scale of the innovations developed within the laboratories, before launching them on the industrial line.

The mixer was more adapted to the mixing of liquids, so the objective of the project was determining if the mixer was adaptable to the mixing of fibres. To do so, various experiments were undertaken. First, the fibres were coloured with ink in order to observe the distribution of the fibres in the mixer. Moreover, the MDI monomer was tinted with the goal of verifying the good homogeneity of the mix of fibres and monomer.

As regards the operation of pressing, a great quantity of material stayed unexploitable on the edges of the boards. So they presented density profiles that were not homogeneous. Because of that, first of all we chose to determine a new pressing protocol to model at best the protocol utilized on the industrial line. Furthermore, given the precarious state of the current press, we decided to model a new pressing tool using SolidWorks software. In addition, we did a finite element model with Ansys software.

Finally, we got interested on the securing of the pilot line. Whether at the level of the toxic vapours of the monomer as with respect to the risks related to the mixer and press themselves (pinching, injuries, etc.).

## Resum (Català)

El nostre projecte ATI tracta sobre la millora de la línia pilot de l'empresa PAVATEX que produeix panells de fusta destinats a la construcció, principalment a l'aïllament tèrmic. Aquests panells estan constituïts per fibres de fusta seques enganxades amb l'ajuda d'un polímer aglomerant, el 4,4'-diisocianat de difenilmetilè (MDI).

La línia pilot està composta per un mesclador que garanteix la barreja de les fibres amb el monòmer aglutinant, així com per una premsa que garanteix la consistència del panell polimeritzant el monòmer gràcies a un sistema de vapor d'aigua. Aquesta línia permet provar a una escala més gran les innovacions portades a terme al si dels laboratoris abans de llançar-les a la línia industrial.

El mesclador estava més adaptat a la barreja de líquid, l'objectiu del projecte era doncs determinar si el mesclador estava realment adaptat a la mescla de fibres. Per això, diversos experiments han sigut realitzats. En primer lloc, les fibres han sigut acolorides amb tinta amb la finalitat d'observar la repartició de fibres dins del mesclador. Després, el monòmer MDI ha sigut tintat amb l'objectiu de verificar la bona homogeneïtat de la barreja de fibres i de monòmer.

Pel que fa a l'operació de premsatge, una gran quantitat de material quedava inexplorable als bords dels panells. Aquests últims presentaven doncs, perfils de densitat que no eren homogenis. Per això, primer de tot hem decidit determinar un nou protocol de premsatge en fi de modelitzar el millor possible el protocol de la línia industrial. A continuació, tenint en compte l'estat precari de la premsa actual, hem decidit modelitzar una nova eina de premsatge utilitzant el programari SolidWorks, seguit de la realització d'una modelització per elements finits amb el programari Ansys.

Finalment, ens hem interessat en la seguretat de la línia pilot, tant pel que fa als nivells dels vapors tòxics de monòmer així com en relació als riscos relacionats amb els mateixos mesclador i premsa (pessics, ferides, etc.).

## ملخص

يهدف مشروعنا إلى تحسين الوحدة التجريبية لشركة پافاتكش المختصة في صناعة الألواح الخشبية المستعملة في مجال العزل الحراري. هاته الألواح مصنوعة من الألياف الخشبية الجافة و التي يتم إصْلَقْها بواسطة ٤،٤ - الميثيلين ثنائي الفينيل الذي إيزوسيانات. الوحدة التجريبية مكونة من خلّاط و آلة ضغط. دور الخلّاط هو إعطاء خلّيط متجانس مكون من ألياف الخشب و المادة اللاصقة. أما آلة الضغط فهي تتوفر على نظام تزويد ببخار الماء يمكن من بلمرة ٤،٤ - الميثيلين ثنائي الفينيل الذي إيزوسيانات و بتالي منح التماسك للوح. صمم الخلّاط في البداية من أجل السوائل و لهذا وجب التأكد من أنه مناسب للأجسام الصلبة أيضا. من أجل ذلك تم إنجاز مجموعة من التجارب، الأولى تقتضي تلوين بعض الألياف بالحبر لمعرفة مدى توزيع الألياف داخل الخلّاط والثانية تقتضي تلوين ٤،٤ - الميثيلين ثنائي الفينيل الذي إيزوسيانات لمعرفة مدى تجانسه مع الألياف. أما في ما يخص آلة الضغط، فقد لوحظ أن كمية مهمة من المادة الأولية تبقى غير مستغلة على أطراف اللوح الذي يتميز بكثافة غير متجانسة. لهذا تم تطوير طريقة ضغط جديدة تحاكي أكثر طريقة الضغط في الوحدة الرئيسية. و بالنظر إلى حالة الجهاز المزرية إرتأينا تصميم نموذج لآلة جديدة باستعمال برنامجي " سوليدوركس" و " أنسيس". و قد تطرقنا في الأخير إلى سلامة استعمال هذه الوحدة في ما يخص إنبعاث بخار السام ناتج عن عملية بلمرة ٤،٤ - الميثيلين ثنائي الفينيل الذي إيزوسيانات و كذلك فيما يتعلق بإستخدام الخلّاط و آلة الضغط بشكل عام.



## Introduction

L'entreprise suisse PAVATEX a inauguré en 2013 à Golbey dans les Vosges une nouvelle usine dont la ligne de production de fibres de bois est la plus performante et écologique de la filière en Europe. Le groupe est spécialisé dans l'isolation (thermique, phonique, ignifuge...) et produit des panneaux isolants en fibres de bois. Depuis sa fondation en 1936, il compte parmi les pionniers dans le domaine de l'isolation en fibres de bois et ne cesse d'innover. Il est aussi particulièrement investi d'un point de vue environnemental car les produits de l'entreprise PAVATEX sont écologiques et durables. En effet, la fabrication repose sur un procédé efficace d'un point de vue énergétique (à Golbey, une partie de l'électricité et des vapeurs d'eau proviennent directement de la papeterie adjacente Norske Skog) et le bois, matière première renouvelable, provient d'exploitations forestières proches de l'usine. [1]

Au cours des dernières années, la production de ces panneaux n'a cessé d'augmenter en raison du développement d'une conscience écologique tant chez les individus, que dans les entreprises. L'innovation possède donc une place très importante au sein d'entreprises comme PAVATEX. En effet, il est nécessaire de toujours pouvoir se distinguer de ses concurrents en proposant des produits innovants, efficaces et toujours plus respectueux de l'environnement. Par conséquent, l'usine de Golbey possède une ligne pilote qui doit leur permettre d'expérimenter de nouveaux panneaux isolants. Cependant, cette dernière est particulièrement vieillissante, dangereuse et peu fidèle vis-à-vis de la ligne industrielle.

Le but de ce projet est donc d'optimiser les deux éléments composants cette ligne pilote : le mélangeur, servant à homogénéiser le mélange fibres de bois et liant, et la presse qui met en forme le panneau. Plus précisément, les enjeux de ce projet sont l'amélioration du mélangeur, de l'homogénéité du dépôt de fibres dans la presse, du système de pressage et de la polymérisation. De plus, étant donnée la dangerosité des deux éléments, il est aussi nécessaire de veiller à limiter les risques potentiels de blessures pour les utilisateurs.

Par conséquent, afin de répondre au mieux à ces exigences, nous débuterons tout d'abord par une étude bibliographique des différents éléments composants la ligne pilote, comme le mélangeur, la presse, le liant, ... Ce qui nous permettra par la suite d'imaginer des protocoles expérimentaux nous permettant tout d'abord de mieux comprendre les problèmes associés, puis d'essayer de trouver des pistes de solutions.

# Partie 1 : Recherches bibliographiques

## A. Les panneaux à base de bois

Selon la norme afnor NF EN 316, le panneau de fibres de bois est un matériau en plaque d'une épaisseur égale ou supérieure à 1,5 mm obtenue à partir de fibres lignocellulosiques avec application de chaleur et/ou de pression [2]

La lignocellulose est un composé très présent dans les parois des cellules des végétaux et du bois dont les molécules s'organisent en polymères.

### 1. Fabrication

Différents procédés de fabrication des panneaux en fibres de bois existent [3] :

Procédé humide ou sous atmosphère humide :

Dans ce procédé (*Figure 1*), des liaisons de types hydrogènes sont créées entre les fibres lignocellulosiques lorsque celles-ci se rapprochent au cours du séchage et du pressage. Plusieurs étapes doivent être effectuées :



Figure 1 : Etapes de fabrication d'un panneau en fibres de bois par un procédé humide

Procédé sec ou à sec :

Etant donné que ce procédé (*Figure 2*) se fait à sec, un liant doit être utilisé, celui-ci peut être :

- organique comme des résines phénols-formaldéhydes et urées-formaldéhydes, qui sont utilisées dans la plupart des cas
- inorganique comme du ciment ou de la magnésie (oxyde de magnésium MgO).

Dans ce cas, différentes étapes sont aussi à effectuer :



Figure 2 : Etapes de fabrication d'un panneau en fibres de bois par un procédé sec

Ces panneaux à base de liants organiques émettent dans la plupart des cas du formaldéhyde, un composé cancérigène (leucémie, ...), il est donc nécessaire de prendre en compte des facteurs de sécurité lors de l'utilisation de ce type de liants.

## 2. Typologie

Les panneaux produits à base de fibres de bois peuvent être classés comme suit [4] :

Tableau 1 : Classification des panneaux en fibres de bois [5]

Procédé de fabrication	Panneau	Nom en anglais donnant le symbole	Symbole	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
<b>Humide</b>	Panneau de fibres dur	Hardboard	HB	≥ 900
	Panneau de fibres mi-dur à haute densité	Medium board high density	MBH	560 - 900
	Panneau de fibres mi-dur à faible densité	Medium board low density	MBL	400 - 560
	Panneau de fibres léger ou panneau isolant	Softboard	SB	230 - 400
<b>Sec</b>	Panneau de fibres à densité moyenne ou médium	Medium density fibreboard	MDF	600- 800

## 3. Types d'adhésifs

### Résines urée-formaldéhyde (UF) :

Ces résines, faisant partie de la famille des aminoplastes, sont opaques et thermodurcissables, formées à partir d'urée et de formaldéhyde par chauffage en milieu basique et généralement en proportion 1 :1. La *figure 3* ci-dessous présente le bilan de la réaction de formation de l'urée-formaldéhyde.

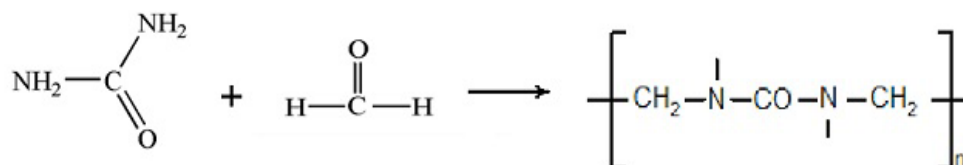


Figure 3 : Formation de résine UF

Elles sont principalement utilisées en tant qu'adhésifs pour des panneaux de particules ou MDF (Medium Density Fiberboard soit des panneaux de fibres à densité moyenne).

Les propriétés des résines UF incluent une haute limite de rupture, un bon module de flexion, une bonne résistance aux hautes températures, une faible absorption d'eau, une haute dureté de surface et une bonne élongation en rupture.

Ces résines sont les plus prisées car ce sont les moins chères, même si elles ne présentent qu'une faible résistance à l'eau.

### **Résines phénol-formaldéhyde (PF) ou phénoplaste :**

Ce sont des résines synthétiques thermodurcissables qui sont obtenues par réaction entre le phénol et le formaldéhyde. Le monomère phénol possédant 3 sites actifs, lors de la réaction de copolymérisation avec le formaldéhyde il se forme un réseau tridimensionnel.

Un exemple de résine UF est la bakélite (marque déposée, voir *Figure 4*) développée entre 1907 et 1909 qui a été le premier plastique fait d'un polymère synthétique.

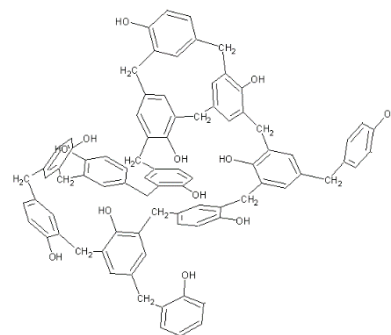


Figure 4 : Structure de la Bakélite [31]

De nombreuses méthodes de production existent afin de permettre une production d'une variété de résines ayant des buts spécifiques. [6]

De plus, ces résines possèdent une bonne résistance à la chaleur et sont moins dures et moins fragiles que les aminoplastes.

### **Résines Mélamine-formaldéhyde (MF) :**

Ces résines (*Figure 5*) faisant partie de la famille des aminoplastes sont dures et thermodurcissables. Elles sont issues de la polymérisation de la mélamine et du formaldéhyde. La mélamine étant un composé hexavalent (6 sites actifs), permet de créer des réseaux denses.

Les résines MF sont principalement connues sous le nom de marque Formica.

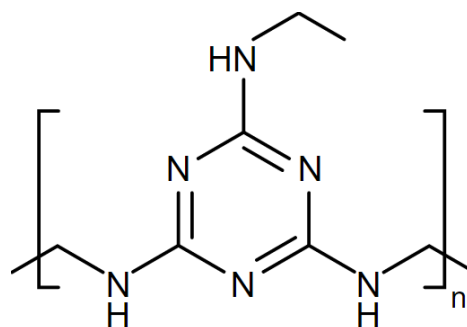


Figure 5 : Résine de mélamine-formaldéhyde [30]

La principale application du MF est la fabrication de stratifié (panneaux à base de couches de papier kraft imprégnées de résine) ou bien de tableaux blancs. De plus, le formaldéhyde étant lié de manière plus forte dans les résines MF que dans les résines UF, cela réduit les émissions de formaldéhyde dans les résines MF.

D'autre part, il est possible de fabriquer ces résines de couleurs claires ou blanches ce qui permet de les utiliser en surface, elles sont aussi peu sensibles à l'hydrolyse et à la lumière, et possèdent une dureté ainsi qu'une rigidité très élevée.

### **Résines Méthylène diphényle diisocyanate (MDI) ou polyuréthane (PU) :**

Le MDI (*Figure 6*) est un diisocyanate aromatique, qui existe en trois isomères, 2,2'-MDI, 2,4'-MDI et 4,4'-MDI, cependant le 4,4' (auss appelée MDI pur) est le plus utilisé. Ce dernier est plutôt utilisé pour la production de polyuréthane (mousses, colles, combinaison de natation, ...).

Bien que les résines MDI et PU soient plus chères, elles sont généralement bien résistantes à l'eau, et possèdent l'avantage de ne pas contenir de formaldéhyde (gaz inflammable et particulièrement toxique). [7]

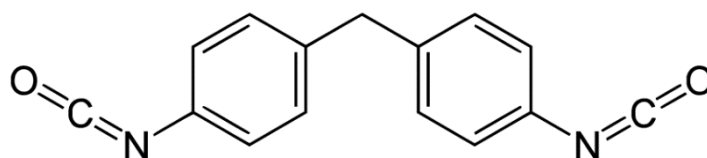


Figure 6 : 4,4'-methylene diphényle diisocyanate [29]

## B. Le liant

### 1. Généralités et fabrication

Le liant utilisé dans notre cas est un polymère de 4,4' diphényl-diisocyanate (MDI) le PMDI pour Polymeric Methylene Diphenylene Diisocyanate (Figure 7). Ainsi, la substance MDI est caractérisée par la présence des deux groupements fonctionnels isocyanates ( $-N=C=O$ ).

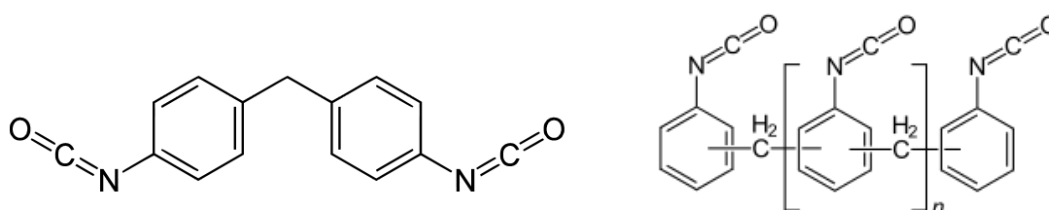


Figure 7 : Formule topologique du monomère MDI (à gauche) et formule du polymère de MDI (à droite) [32]

Le polymère de MDI (PMDI) est en réalité composé à la fois de MDI polymérisé (de l'ordre de 50%) et d'oligomères, c'est-à-dire de petites chaînes de polymère (avec environ entre 2 et 6 motifs de monomères) de masse molaire inférieure à  $2000\text{g.mol}^{-1}$ . [8]

Ce polymère est aujourd'hui le produit synthétique le plus récent dans le domaine des résines thermodurcissables, il est principalement utilisé dans des applications d'isolation (mousses thermo-isolantes par exemple) ou bien de collage (bois-métal par exemple). Cependant, bien qu'il ne libère pas de formaldéhyde, les substituants isocyanates ( $-N=C=O$ ) se révèlent aussi toxiques (vapeurs irritantes, ...). [9]

Il existe différentes variantes de procédé de fabrication du PMDI, cependant, le procédé le plus répandu consiste en [8] :

- une étape de condensation du formaldéhyde et d'aniline (Figure 8), c'est-à-dire que ces deux molécules vont se combiner (en plusieurs étapes) afin de former un condensat (avec élimination d'un sous-produit)

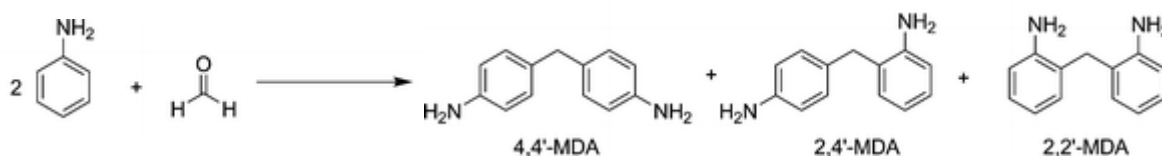


Figure 8 : Schéma de réaction simplifié entre 2 anilines et le formaldéhyde (méthanal) [33]

- puis une réaction entre le phosgène (ou dichlorure de méthanoyle) donne le MDI.

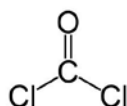


Figure 9 : Formule topologique du phosgène

Finalement, bien que le coût du MDI soit relativement élevé (voir *Tableau 2*), son utilisation pour la fabrication de panneaux de bois ne cesse d'augmenter. [9]

Tableau 2 : Prix des liants par tonne [9]

Liants	Prix (€/par tonne)
UF (urée-formaldéhyde)	<b>500</b>
MF (Mélamine-formaldéhyde)	<b>1000-1250</b>
PF (phénol formaldéhyde)	<b>1000-1250</b>
PMDI	<b>2000-2500</b>

## 2. Propriétés

Le MDI se trouve à température ambiante à l'état liquide. Il est particulièrement intéressant car il permet des temps de pressage courts (augmentation de la productivité des panneaux de bois par exemple) et il possède d'excellentes propriétés de réticulation, ce qui lui permet de créer une adhésion chimique (liaisons chimiques ioniques ou covalentes) avec les cellules de bois.

De plus, à froid ce polymère est très faiblement volatil ce qui permet de réduire les dégagements lors de son utilisation. Cependant, les vapeurs de monomère restent très irritantes et toxiques. [9]

Le tableau ci-dessous résume certaines propriétés du monomère MDI et de son polymère (PMDI) :

Tableau 3 : Propriétés MDI et PMDI [8]

	<b>4,4' MDI</b>	<b>MDI polymère</b>
<b>Etat physique</b>	Solide à T ambiante	Liquide huileux
<b>Viscosité (mPa.s)</b>	4,7 (50°C)	100-800
<b>Point de fusion</b>	40	5
<b>Densité</b>	1,182 (50°C)	1,23 (25°C)
<b>Point d'éclair<sup>1</sup></b>	211°C	208°C
<b>Point de feu<sup>2</sup></b>	232°C	>200°C
<b>T° d'auto inflammation</b>	>601°C	>600°C
<b>Pression de vapeur saturante<sup>3</sup> (Pa, à 20°C)</b>	6,2.10 <sup>-4</sup>	3,1.10 <sup>-4</sup>
<b>Densité des vapeurs (air=1)</b>	8,5	?

<sup>1</sup> Point d'éclair : c'est la température à partir de laquelle un combustible émet suffisamment de vapeurs qui, mélangées à l'air, s'enflamment sous l'effet d'une source d'énergie sans que la combustion s'entretienne.

<sup>2</sup> Point de feu : c'est la température à partir de laquelle un combustible s'enflamme en présence d'une flamme avec maintien de la combustion après retrait de la flamme.

<sup>3</sup> Pression de vapeur saturante : pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide ou solide à T° donnée dans un système fermé.

On remarque ainsi, que la densité des vapeurs de MDI est bien supérieure à celle de l'air, ce qui impose donc que les vapeurs de monomère ont tendance à se condenser vers le sol. De plus, on constate que ce polymère est difficilement inflammable car son point d'éclair est de 208°C ce qui est élevé sachant qu'on considère qu'un composé est combustible lorsque son point d'éclair est compris entre 55 et 93,3°C. Ainsi, le PMDI est difficilement inflammable mais n'est pas combustible ce qui est très intéressant dans le cas d'une utilisation comme isolant thermique dans une maison. [8]

## C. Le mélangeur

### 1. Aspects fondamentaux du mélange de solides

L'objectif d'une opération de mélange est d'atteindre un arrangement régulier parfait (*Figure 10*) c'est-à-dire que chaque particule d'un constituant soit voisine de l'autre. Néanmoins, la probabilité d'atteindre une telle configuration est nulle à l'échelle industrielle. C'est pourquoi les industriels ont plutôt pour objectif d'atteindre un mélange parfaitement en désordre (*Figure 10*) dans lequel on trouve une particule du constituant en tout point du solide.

On parle aussi de mélanges ordonnés lorsque les particules sont fines, dans ce cas elles sont réparties en couches minces les unes par rapport aux autres.

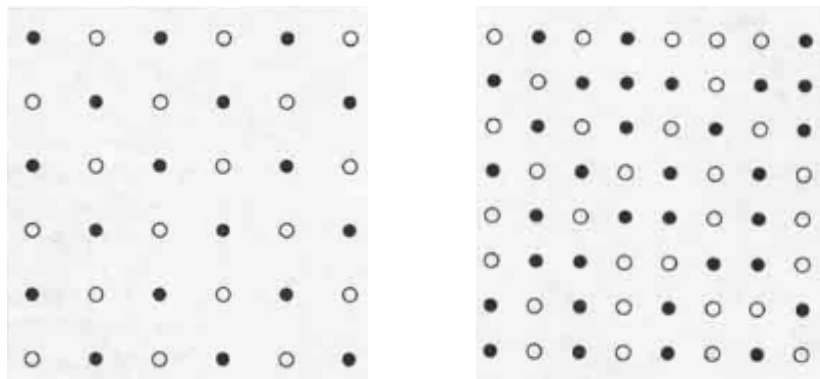


Figure 10 : Arrangement régulier parfait (à gauche) et mélange parfaitement en désordre (à droite) [10]

Notons aussi que la qualité du mélange n'est pas l'objectif principal mais un paramètre important pour aboutir à une propriété caractéristique du produit final. Dans notre cas, la répartition du MDI dans tout le mélange afin d'avoir un bon collage lors du pressage. [10]

### 2. Mécanismes de mélange et de ségrégation

#### a) Mécanisme de mélange

On peut définir trois types de mécanismes de mélange :

- par convection qui correspond au transfert d'un bloc de particules d'un endroit du mélangeur à un autre qui aboutit à un réarrangement au niveau macroscopique ;
- par diffusion, qui permet un réarrangement au niveau microscopique par le déplacement individuel des particules dans le mélangeur ;

- par cisaillement, qui se manifeste par la présence simultanée des deux mécanismes précédent, il se traduit par l'application d'un effort mécanique, on a alors glissement des couches de particules les unes sur les autres.

La figure suivante montre l'action de chaque mécanisme dans un mélangeur industriel selon la prédominance de chaque mécanisme. [10] [11]

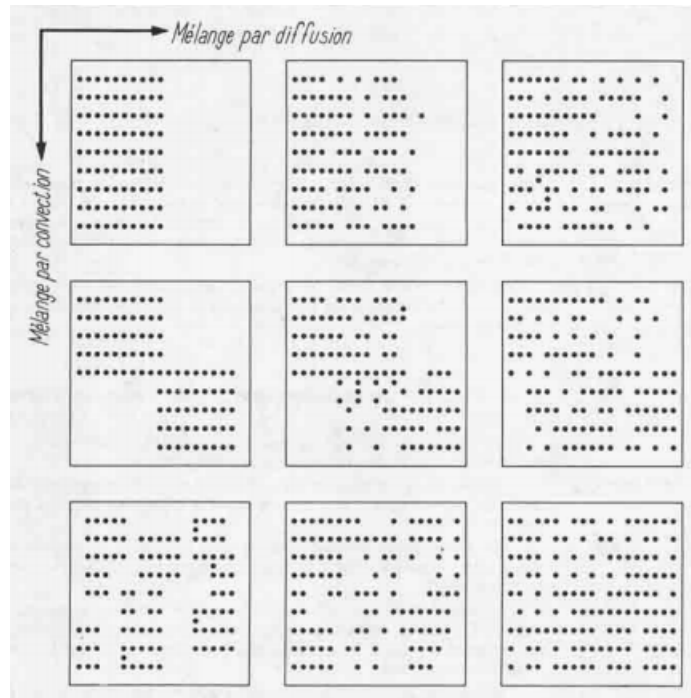


Figure 11 : Schématisation des actions de convection et de diffusion  
[10]

#### b) Mécanisme de ségrégation

La ségrégation est le phénomène indésirable qui accompagne le processus du mélange en raison d'une différence de propriétés physico-chimiques entre les composants du mélange. Celle-ci peut se manifester de différentes manières :

- la ségrégation par trajectoire qui consiste à séparer les constituants du mélange ou bien les particules d'un des constituants du mélange grâce à l'action de la force centrifuge ou de la gravité,
- la ségrégation par élutriation qui correspond au freinage de la chute de fines particules par l'air chassé par les plus grosses particules,
- la ségrégation par percolation qui correspond au glissement de fines particules dans les interstices entre les particules, celle-ci est souvent rencontrée lors d'un versement en tas ou au cours des mouvements relatifs des particules lors de l'opération. [11, 10]



### 3. Exemples de mélangeurs

Les mélangeurs **convectifs** (*Figure 12*) possèdent un mobile permettant l'agitation dans une cuve fixe ce qui déplace des blocs de particules au sein du mélangeur [11].

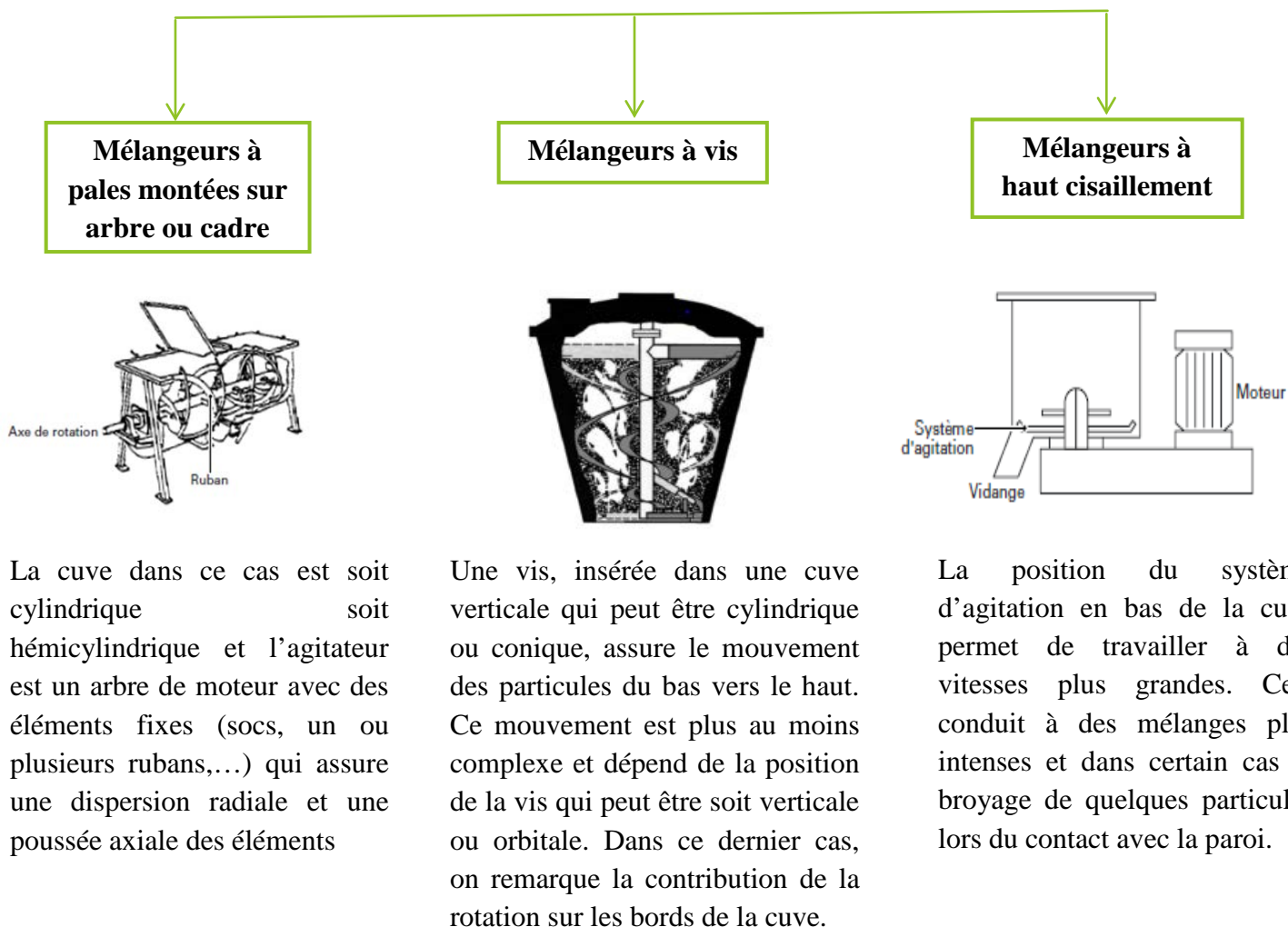
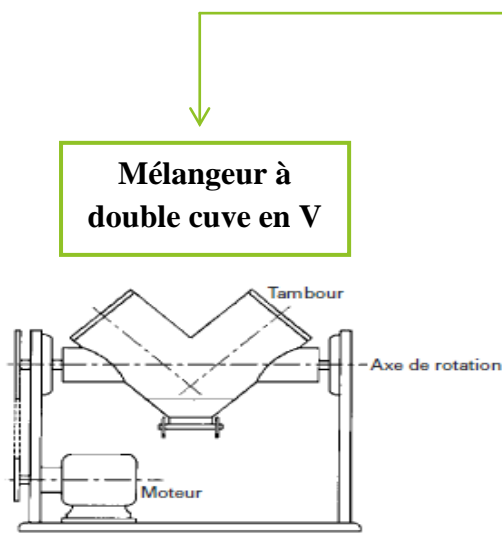


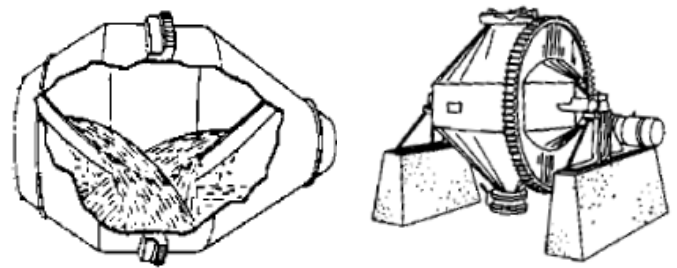
Figure 12 : Types de mélangeurs convectifs

Dans le cas des mélangeurs à **tambour** (*Figure 13*) c'est la cuve qui est mise en mouvement, les particules subissent alors des avalanches plus ou moins marquées. Parmi les plus couramment utilisés on trouve [11]:



**Mélangeur à double cuve en V**

Dans ce cas on a deux cylindres qui forment un angle droit entre eux. L'axe de rotation est soit dans le plan de la cuve et dans ce cas l'opération du mélange s'effectue dans l'espace de contact des deux cuves, soit le mouvement s'effectue perpendiculairement à la cuve et dans ce cas les particules passent d'une cuve à l'autre pour se mélanger.

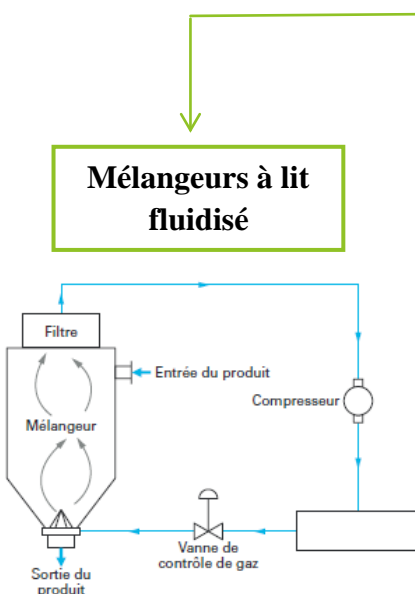


**Mélangeur à double cône**

Dans ce cas, le mélangeur est constitué de deux cônes liés entre eux par un cylindre et l'ensemble est mis en rotation par rapport à l'axe du cône.

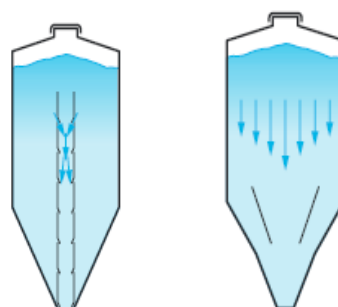
Figure 13 : Types de mélangeurs à tambour

Et finalement les mélangeurs **statiques** (Figure 14) sont fixes, le mélange se fait alors par gravitation ou grâce à la circulation d'un gaz [11].



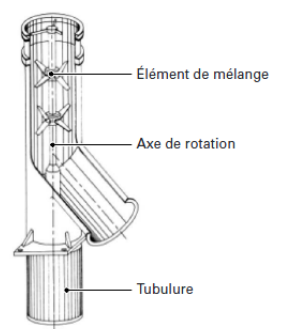
**Mélangeurs à lit fluidisé**

Un lit de particules est placé dans une cuve de forme cylindro-conique et le gaz circule dans la cuve pour assurer l'opération.



**Mélangeurs en silo**

Le mélange se fait dans ce cas d'une façon axiale par la vidange du silo (recyclage au sommet ou vider le compte nue dans un autre silo). Et si on veut avoir un mélange radial on utilise des chicanes, ou bien des mini silos ou bien des collecteurs qu'on insère dans la cuve.



**Mélangeurs en ligne**

La cuve est sous forme de conduite contenant des éléments fixes ou mobiles qui assurent le mélange radial des particules.

Figure 14 : Types de mélangeurs statiques

## 4. Choix d'un mélangeur

En se basant sur des critères qualitatifs Sheffield et Miles, il a été possible de construire le diagramme ci-dessous, facilitant le choix d'un mélangeur adéquat.

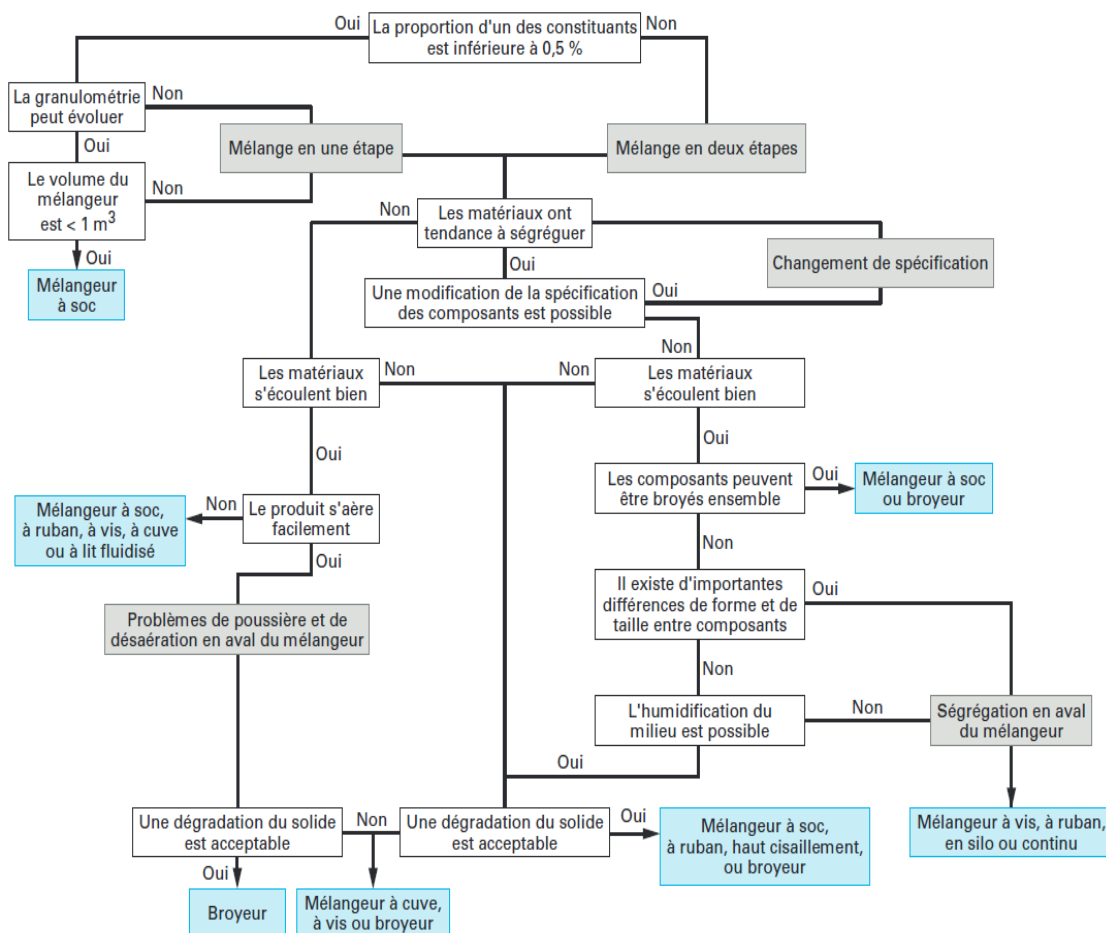


Figure 15 : Organigramme d'aide à la décision d'un choix de mélangeur [11]

## 5. Cas du mélangeur de la ligne pilote

Un mélangeur est un appareil permettant l'homogénéisation de différentes substances, dans notre cas ce sera des fibres de bois (sèches) avec un liant MDI. Le but du mélangeur est donc de répartir au mieux le liant autour des fibres afin que, par la suite lors de la polymérisation, le panneau soit le plus homogène en densité possible.

Ainsi, le mélangeur (Figure 16) est composé de pales devant assurer l'agitation



Figure 16 : Mélangeur de la ligne pilote

au sein du mélangeur. Cependant il est plutôt prévu pour des mélanges de fibres humides, et les fibres utilisées sur la ligne industrielle, et donc pilote, sont sèches, ce qui peut conduire à un premier problème au niveau de l'homogénéité.

De plus, après ajout des fibres dans le mélangeur, celui-ci est fermé, et le liant est injecté par 2 buses, néanmoins en raison d'un problème mécanique de mise sous pression des buses, l'arrivée du liant se fait par simple gravité.

De surcroît, le mélangeur présente un problème de sécurité, en effet, les fibres encollées sont récupérées simplement en ouvrant le mélangeur par le dessus, ce qui présente des risques pour l'utilisateur étant donné que l'exposition au MDI présente de réels dangers pour la santé.

## D. Phase de pressage

Pour pouvoir effectuer un pressage efficace (*Figure 17*), les fibres sont d'abord pré-pressées afin de diminuer de l'énergie nécessaire lors du pressage à chaud. Ce dernier se fait dans l'objectif de polymériser le liant et d'obtenir l'épaisseur ainsi que la densité du panneau désirées.

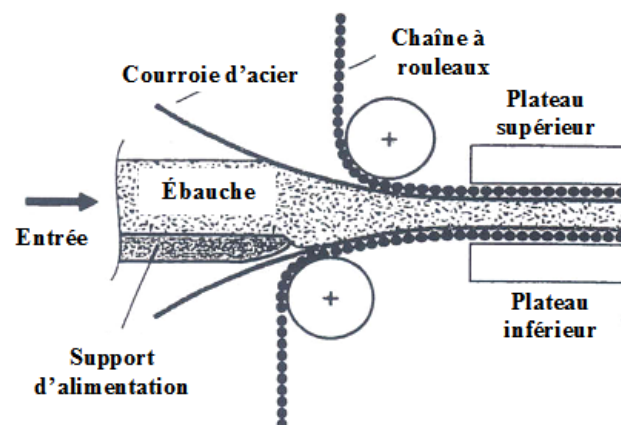


Figure 17 : Procédé de pressage [12]

On porte une attention particulière au pressage des panneaux en fibres de bois car cette phase du procédé se caractérise par :

- une importante consommation d'énergie,
- la présence des phénomènes de transfert de chaleur et de masse qui influent sur la qualité du produit-fini,
- les durées de pressage ont un impact direct sur la productivité,
- le profil de densité se forme exactement à cette étape.

De nombreux processus physiques et chimiques se produisent simultanément durant ce processus de compression de l'ébauche à haute température. Donc, les principes de base pour les traiter devraient être abordés en considérant tous les phénomènes physiques locaux : le phénomène de transfert de masse et de chaleur, les stratégies de contrôle de la presse et les simulations par ordinateur.

## 1. Evolution du champ de pression lors du pressage

Le cycle de pressage peut globalement être modélisé par les trois étapes suivantes comme il est indiqué à la *figure 18* [12]:

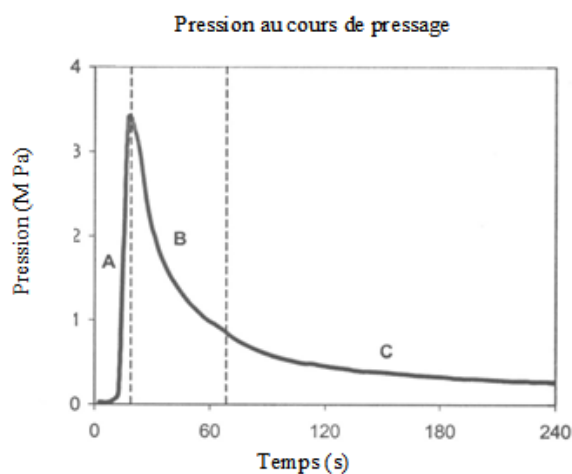


Figure 18 : Evolution de la pression en fonction du temps [12]

**A. Consolidation** : le plateau supérieur de la presse entre en contact avec la surface supérieure de l'ébauche et l'élimination des espaces vides a lieu jusqu'à ce que l'épaisseur finale soit atteinte. Cette étape est équivalente à la fermeture de la presse désignée par TFP (Temps de fermeture de la presse).

**B. Relaxation transitive** : Juste après la consolidation, la phase de relaxation commence immédiatement. La diminution de la pression durant cette étape est graduelle et donne du temps pour la polymérisation du liant.

**C. Relaxation asymptotique** : la diminution de la pression varie d'une façon moins prononcée comparée à la phase B car le plateau supérieur maintient le contact avec l'ébauche.

On appelle **décompression ou dégazage** l'étape finale qui se produit quand le plateau supérieur se dégage de l'ébauche. L'ouverture des plateaux est totale et plus aucune pression n'est exercée sur l'ébauche.

## 2. Formation du profil de densité des panneaux lors du pressage à chaud

A partir des travaux de Winistorfer et al. (2000). On parvient à comprendre les phases par lesquelles passe l'ébauche lors du pressage. Le profil vertical de densité (VDP) commence à se former dès que la pression maximale est atteinte. La densité des différentes couches dépendra alors seulement de la teneur en humidité dans les couches considérées ainsi que de la température dans celles-ci. Pour mettre en évidence le changement de densité pendant le pressage on pourra se référer au modèle suivant [12]:

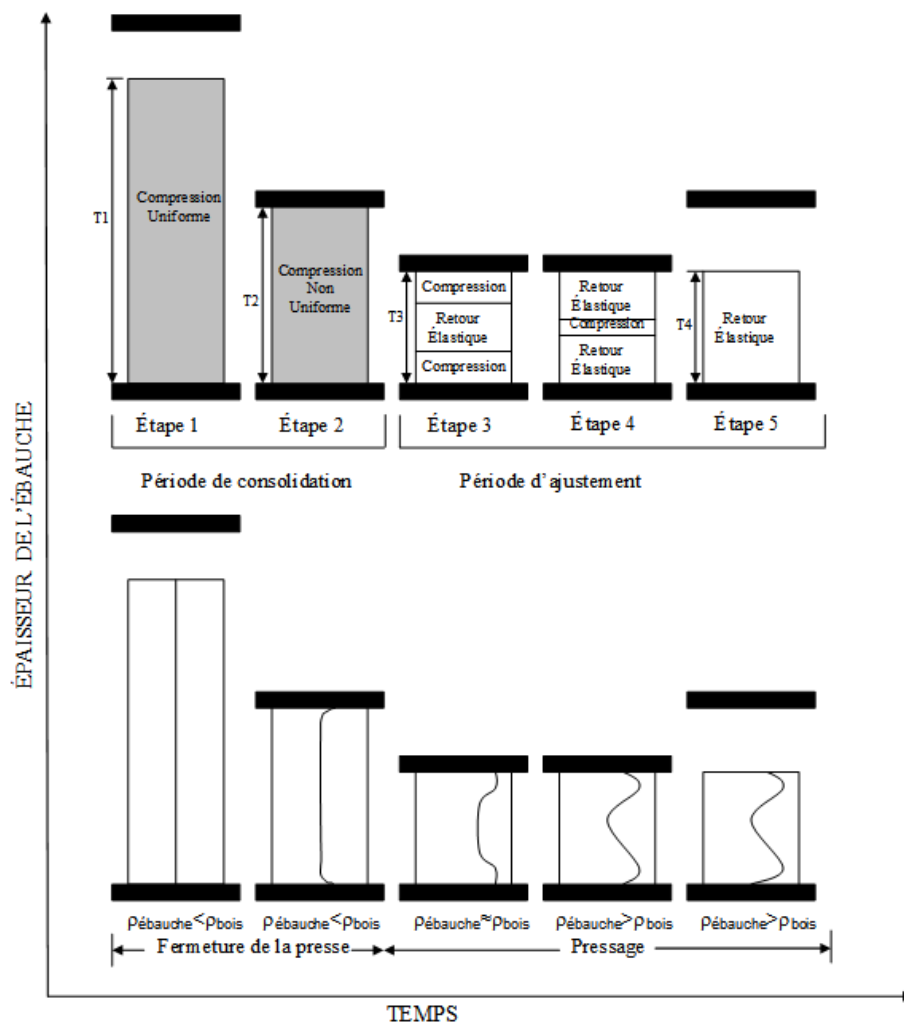


Figure 19 : Evolution de la densité au cours du temps [12]

**I .Période de consolidation** : celle-ci s'étend tant que le plateau de la presse ne s'arrête à sa position finale, c'est-à-dire, tant qu'on n'atteint pas l'épaisseur voulue pour l'ébauche. La période de consolidation se divise en deux étapes comme explicité ci-dessous:

**Étape 1** : consolidation uniforme de toutes les couches de l'ébauche. Durant cette étape, l'ébauche est en compression uniforme continue et le plateau de la presse se ferme rapidement (vitesse de fermeture de la presse). Cela conduit à une diminution importante du volume des vides dans l'ébauche, cependant, aucun profil de densité ne se forme durant cette étape.

**Étape 2** : consolidation non - uniforme de toutes les couches quand l'épaisseur de pressage atteint son niveau nominal. La température initiale et les changements de la teneur en humidité dans les couches superficielles de l'ébauche font que compression non-uniforme y a lieu en premier (consolidation, compression, flexion). Il n'y a par contre pas de changement significatif dans les couches du centre. On note aussi que la densification des couches extérieures est plus rapide qu'ailleurs. À la fin de cette étape on obtient une ébauche dans laquelle la densité est plus élevée à la surface qu'au centre.



**II. Période d'Ajustement** : correspond à la phase durant laquelle l'épaisseur de pressage minimale est atteinte. La période d'ajustement est divisée en trois étapes.

**Étape 3** : consolidation de la couche extérieure de l'ébauche. Le gradient de température dans l'ébauche, entraîne la déformation microstructurale des fibres de bois (des lamelles, des particules, des fibres) dans les couches externes sous l'effet de la pression de la presse et de la température qui y est plus élevée. Quand la pression diminue les contraintes de relaxation apparaissent dans la couche extérieure. Par contre, la couche du centre plus froide agit comme un ressort dû à un rapport élevé de contrainte - déformation. En effet, la température du centre géométrique de l'ébauche est plus basse, il y a donc une réponse du type ressort plus importante. D'une façon générale, le profil vertical de densité se développe principalement à partir des actions qui se produisent dans les étapes 2 et 3. Lorsque la vitesse de fermeture est très lente, le profil vertical de densité se développe principalement à cause des phénomènes qui se produisent à l'étape 2. Il y a une élévation de vitesse de ressort au centre de l'ébauche et une augmentation de la vitesse de compression dans le matériel près de la surface de l'ébauche. L'étape 3 est complétée quand la différence de température entre la surface et les couches centrales de l'ébauche est maximale.

**Étape 4** : consolidation de la couche du centre de l'ébauche. Alors que la température de la couche centrale s'élève et que la teneur en humidité devient sensiblement la même que celle de la couche extérieure, le rapport contrainte - déformation de la couche interne augmente augmentant ainsi sa densité. Il est important de noter que la densité des couches extérieures diminue durant cette étape car les conditions de température et compression générées durant les étapes 2 et 3 ne sont plus maintenues.

**Étape 5** : appelée phase de « spring – back » ou de « retour – élastique ». L'échappement de la vapeur d'eau qui se produit durant cette étape est le produit du relâchement de l'effort de compression auparavant exercé par le plateau. Ce phénomène peut être caractérisé comme un retour – élastique car l'épaisseur (T4) après le pressage est généralement plus grande que l'épaisseur (T3) en fin de pression (Figure 16). Ce retour - élastique ne s'effectue pas de façon homogène et uniforme en raison de la structure non-uniforme de l'ébauche, de la température, de la teneur en humidité et du gradient de densité. Un retour – élastique plus élevé est par ailleurs prévisible au niveau du centre de l'ébauche.

### 3. Cas de la presse de la ligne pilote

L'actuelle presse de la ligne pilote (*Figure 20*) est particulièrement rudimentaire et dangereuse. En effet, à la sortie du mélangeur, les fibres de bois sont disposées entre deux bandes et la plaque de pressage est posée dessus par l'utilisateur. Cela peut correspondre à l'équivalent de l'étape de pré pressage de la ligne industrielle, cependant cette étape présente des risques :

- l'utilisateur peut se blesser en raison du poids de la plaque ;



Figure 20 : Presse de la ligne pilote

- la plaque étant disposée sans guide, le pré pressage peut être irrégulier car la plaque peut être inclinée.

Ce second problème persiste au cours du pressage, en effet le vérin utilisé sur la presse n'a qu'un seul point d'appui au centre de la presse, ce qui induit des problèmes d'inclinaison de la plaque et donc un panneau non homogène en épaisseur.

D'autre part, la vapeur d'eau arrive sous une pression de 2,8 bar par un tube percé traversant la plaque au centre, ce qui doit très certainement poser des problèmes d'homogénéité de la répartition de la vapeur.

Ainsi, il sera nécessaire d'effectuer d'importants changements en ce qui concerne cet élément de la ligne pilote, notamment afin de le sécuriser, mais aussi dans le but d'augmenter l'homogénéité des panneaux pour que les expériences ultérieures sur la ligne pilote se rapprochent au maximum des panneaux produits sur la ligne industrielle.

## E. Problèmes de sécurité

### 1. Les dangers du MDI

La surexposition au MDI (vapeurs, liquide, en aérosol) présente de réels dangers pour la santé. De plus, différentes voies d'exposition sont envisageables :

- les voies respiratoires,
- les voies cutanée ou oculaire,
- l'ingestion.

Tout d'abord, le MDI peut être pulvérisé et le risque d'inhalation augmente fortement si une ventilation correcte n'est pas assurée. Dans ce cas, l'utilisateur est en danger car le MDI n'est perceptible pour l'homme uniquement à des concentrations largement supérieures aux limites d'exposition acceptables fixées par les réglementations. Par exemple, la Sécurité et Administration de la Santé au Travail (Occupational Safety and Health Administration- OSHA) et d'autres organisations telles que l'American Conference of Governmental Industrial Hygienistes (ACGIH) fixent cette limite à la concentration maximale dans l'air à laquelle un utilisateur peut être exposé sans la nécessité d'une protection respiratoire (soit 0,2ppm voire 0,005ppm). [13] [14]

En effet, ce monomère irrite les voies respiratoires provoquant des difficultés à respirer et une surexposition peut amener à une sensibilité au MDI, une allergie ou des crises d'asthme. Ces effets peuvent se produire immédiatement après l'exposition ou bien plusieurs heures après, dans ce cas, toute autre exposition doit être évitée. En cas de surexposition, il est nécessaire d'amener la personne dans une zone aérée et de faire appel à un médecin. De plus des règles de précaution doivent être respectées : seule une personne qualifiée peut fournir de l'oxygène ou mettre en place une respiration artificielle.



D'autre part, il est nécessaire de porter des lunettes de protection car un contact avec les yeux provoque des irritations, voire une déchirure. En cas de contact, il faut immédiatement effectuer un lavage de l'œil à l'eau pendant 15min.

De plus, afin d'éviter tout contact avec la peau, l'utilisateur se doit de porter une combinaison car le contact avec la peau engendre des rougeurs, enflures, ou démangeaisons. En cas de contact, il est aussi nécessaire de laver abondamment avec de l'eau si possible chaude la zone. Il faut aussi se débarrasser des vêtements ou autres objets contaminés par le MDI.

Finalement, l'ingestion du MDI provoque des irritations de la bouche, de la gorge ou bien de l'estomac. Dans tous les cas cités précédemment, il est nécessaire de consulter dans les plus brefs délais un médecin.

Là où il y a un risque d'exposition au-dessus des limites d'exposition applicables, l'utilisateur doit envisager d'utiliser au minimum :

- une ventilation appropriée,
- la protection des yeux par des lunettes
- le port de gants résistants au MDI
- en cas d'une exposition de longue durée, le port d'une combinaison à manches longues, de bottes, et le port d'un masque est exigé.

Enfin, des précautions sont aussi à prendre en compte lors de la manipulation et du stockage du monomère MDI. Il est ainsi nécessaire de porter des vêtements assurant la protection des utilisateurs, de suivre les procédures établies par les employeurs (entretien, chargement, urgences, ...), ou bien d'assurer un bon entretien des locaux et une bonne maintenance de l'équipement. [15] [16] [17]

## **2. Gestion des risques au niveau des machines**

La gestion des risques permet d'identifier, d'évaluer, et de donner des priorités aux différents risques pouvant être liés aux machines. Il s'effectue généralement en deux étapes, tout d'abord l'appréciation du risque, qui vise à analyser et évaluer tous les risques, puis une seconde étape de réduction du risque afin de déterminer les possibilités à mettre en œuvre pour atteindre des objectifs de sécurité. La *figure 21* ci-dessous illustre ces deux étapes.

Tout d'abord, l'étape d'appréciation du risque vise à déterminer précisément les conditions d'utilisation de la machine, afin de pouvoir, par la suite déceler les différents phénomènes pouvant mettre en danger l'utilisateur. Ces phénomènes pouvant être d'origines variées : mécanique (pour nous par exemple l'ouverture du mélangeur ou de la presse), électrique (appareils sous tension), thermiques, ... doivent être clairement établies afin de pouvoir déterminer pour chaque phénomène les situations associées pouvant mettre en danger l'utilisateur. Enfin, une comparaison de ces différentes situations permet de déterminer quelles sont les situations à traiter en priorité, et quelles situations ont un risque suffisamment faible pour être tolérées. Pour classer les risques, il faut tenir compte de la gravité (lésions

graves, légères, ...), mais aussi de la probabilité qu'à chaque situation dangereuse de se produire.

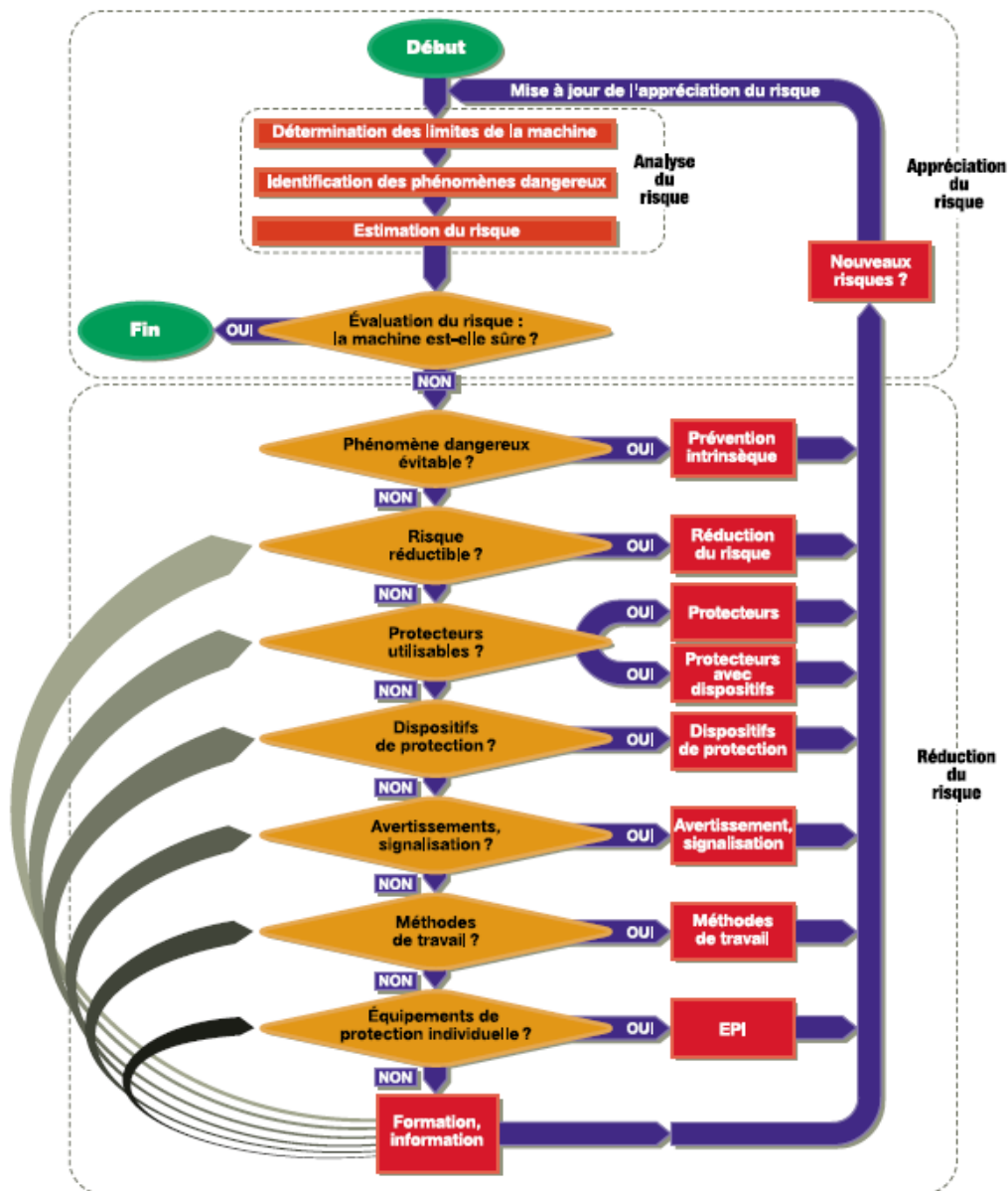


Figure 21 : Etapes de la gestion des risques [18]

Par la suite, il faut s'intéresser à la réduction des risques déterminés, le but principal étant de l'éliminer totalement. Cependant, il n'est pas toujours aisé d'éliminer un phénomène dangereux, dans ce cas des systèmes de protection des utilisateurs doivent être mis en place afin de réduire les risques liés aux machines (par exemple un système de verrouillage du mélangeur)

De plus, dans les cas où les risques ne peuvent pas être évités, il est nécessaire d'en avertir les utilisateurs, de leur fournir des équipements assurant leur protection et de les former afin de les informer des risques auxquels ils sont exposés. [18]

Finalement, il est nécessaire d'exécuter à nouveau cette procédure une fois les modifications mises en place afin de vérifier que ces solutions permettent effectivement une réduction des risques.

Dans notre cas, il serait intéressant d'effectuer une telle procédure afin de déterminer les solutions permettant d'assurer une meilleure sécurité aux usagers de la ligne pilote.

Par exemple, il faudrait éviter tout risque d'écrasement (mains, doigts) lors de l'utilisation de la presse, ou bien du mélangeur. Ce problème pourrait être résolu en laissant un écartement minimal entre les pièces mobiles.

## F. Analyse statistique : design d'expériences

Dans les expériences que l'on va réaliser, différentes variables seront sous notre contrôle. Afin de connaître avec précision comment chacun de ces facteurs influence (ou non) les caractéristiques des panneaux isolants en fibres de bois, il sera nécessaire de réaliser un plan d'expériences.

Lors du plan d'expériences les variables pouvant avoir une influence sur les caractéristiques de qualité et que l'on peut contrôler s'appellent « facteurs de contrôle ». D'autre part, les caractéristiques sont dénommées « réponses ». Le produit ou procédé de production est considéré comme une boîte noire qui a comme entrées les facteurs de contrôle et comme sortie les valeurs des caractéristiques.

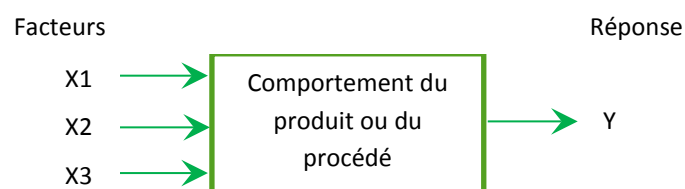


Figure 22 : Schéma d'une analyse statistique

### 1. Planification des expériences

Il est nécessaire de limiter le nombre d'expériences car plus le nombre de facteurs est important, plus le nombre d'expériences à réaliser afin de connaître l'influence de ces facteurs est important. Or, il est impossible pour des raisons de temps et/ou de matières premières de réaliser un trop grand nombre d'expériences.

Ayant considéré les objectifs et ressources disponibles, il faut décider des conditions avec lesquelles le premier groupe d'expériences sera réalisé, de sorte que les connaissances acquises de cette première série d'expériences puissent être utilisées afin de déterminer quelles seront les conditions expérimentales des séries suivantes. [19]

## 2. Plans factoriels

La caractéristique principale des plans d'expériences connues comme plans factoriels est d'expérimenter toutes les combinaisons de valeurs des facteurs possibles. C'est à dire, si on a 3 facteurs et que chacun d'eux peu avoir 2 valeurs possibles, le nombre d'expériences à réaliser sera  $2^3=8$  (voir *Figure 23*).

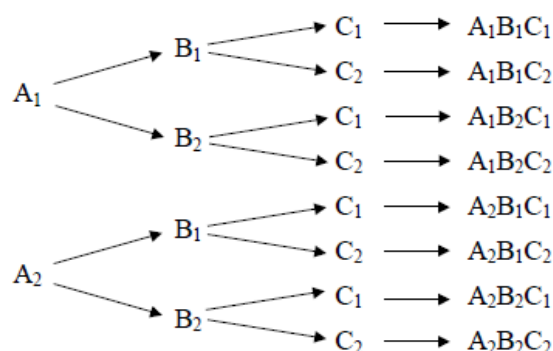


Figure 23 : Plan factoriel avec 3 facteurs

Afin de limiter le nombre d'expériences à réaliser, il faut limiter le nombre de valeurs à assigner à chaque facteur à 2, c'est-à-dire que chacun des facteurs peut seulement prendre 2 valeurs différentes. Ceci est un plan à deux niveaux, il exige la réalisation de  $2^k$  expériences, avec 2 le nombre de niveaux et k le nombre de facteurs. D'autre part, il est aussi possible d'utiliser des plans factoriels fractionnaires qui ont le même but (réduire le nombre d'expériences). [19]

## 3. Matrice du plan

La matrice du plan est la relation entre les conditions sur lesquelles on va à réaliser l'expérimentation.

Par exemple, dans le cas précédent où l'on avait 3 variables, et 2 niveaux pour chaque variable, les conditions de l'expérimentation pour le design  $2^3$  sont représentées dans le tableau suivant, où le signe '-' indique le paramétrage bas et le signe '+' le paramétrage haut de chaque facteur. Donc ce tableau (*Tableau 4*) indique le nombre d'expériences que l'on devra réaliser avec les paramétrages de chaque facteur que l'on devra prendre.

Tableau 4 : Matrice de plan factoriel pour un plan factoriel  $2^3$

N°	F1	F2	F3	Réponse
1	-	-	-	X1
2	+	-	-	X2
3	-	+	-	X3
4	+	+	-	X4
5	-	-	+	X5
6	+	-	+	X6
7	-	+	+	X7
8	+	+	+	X8

L'ordre avec lequel on présente la séquence d'expériences à réaliser s'appelle ordre standard. On observe que pour le premier facteur on alterne -1 et +1, pour le deuxième on alterne deux -1 et deux +1 et ainsi de suite. [19]

#### **4. Plans factoriels fractionnaires**

Il est évident que lors de la réalisation de plans factoriels  $2^k$  complets le nombre de conditions expérimentales augmente rapidement lorsque l'on travaille avec de nombreux facteurs. Par exemple, avec 7 facteurs, un plan factoriel complet  $2^7$  suppose alors la réalisation de 128 expériences. Ainsi, dans la plupart des cas le nombre d'expériences est très excessif.

L'idée des plans factoriels fractionnaires est donc de réduire le nombre d'expériences du plan factoriel complet. Dans ce cas, la réponse finale n'est pas exactement la réponse réelle, il y a une erreur qui cependant reste peu significative. En effet, généralement les interactions entre les facteurs, c'est-à-dire lorsqu'une réponse dépend de plusieurs facteurs à la fois, ne sont pas significatives. Cela permet donc de créer des matrices de plan permettant de calculer simplement les effets principaux et les interactions de deux facteurs, en supposant que les interactions d'ordre supérieures sont négligeables. Au final, cela réduit le nombre d'expériences du plan factoriel complet.

Par exemple, on peut réduire le nombre d'expériences d'un plan complet  $2^5$  à un plan de type  $2^{5-1}$  et  $2^{5-2}$ , et passer de 32 à 16 ou 8 expériences. [19]

#### **5. Concept de résolution**

Il faut savoir que lorsqu'on réduit le nombre d'expériences on augmente le risque de confondre les facteurs, c'est-à-dire que dans le cas où une réponse dépendrait de deux paramètres (ou plus) on ne pourrait pas discerner lequel de ces paramètres est significatif.

Plus la résolution est faible, plus grand est le niveau de confusion. La résolution est représentée avec les chiffres romains III, IV, V...

La *figure 24* présente le logiciel de calcul statistique Minitab permettant de résoudre des plans factoriels beaucoup plus complexes et permet de déterminer le niveau de résolution obtenu en cas d'utilisation de plans factoriels fractionnaires. Normalement une résolution de V ou plus sera parfaitement acceptable, une résolution de IV sera acceptable seulement si la précision demandée n'est pas élevée dans l'étude menée tandis qu'une résolution de III ne sera en aucun cas acceptable. [19]

Available Factorial Designs (with Resolution)														
	Factors													
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Figure 24 : Sélection du plan factoriel avec Minitab

## Partie 2 : Rapport expérimental

### I. Expériences sur le mélangeur

Tout d'abord, il est nécessaire de s'assurer que le mélange des fibres et du monomère est homogène avant de pouvoir se pencher sur les améliorations possibles de la presse.

#### A. Modification du mélangeur actuel

##### 1. Changement des buses de pulvérisation

Auparavant, les buses utilisées sur la ligne pilote étaient des buses de pulvérisation plus adaptées à la pulvérisation d'eau. Ainsi, leur utilisation à la pulvérisation du monomère n'était pas efficace et engendrait une usure importante en raison de l'attaque des joints par le monomère.

Ces buses ont donc dû être remplacées par des nouvelles (*Figure 25*) en acier inoxydable, qui seront ainsi plus résistantes au monomère et qui correspondent aux buses réellement utilisées pour la pulvérisation d'antidérapant sur la ligne industrielle. Celles-ci sont composées d'une aiguille contrôlée avec un système pneumatique (voir schéma éclaté en [Annexe 1](#)) qui peut se trouver dans 2 positions qui permettent soit d'ouvrir, soit de fermer les buses.



Figure 25 : Schéma de la buse

Cependant, les têtes des deux buses doivent être changées, car celles actuellement présentes sont des têtes de pulvérisation coniques. Pour avoir une pulvérisation mieux répartie à l'intérieur du mélangeur il est plus approprié d'utiliser des têtes de pulvérisation plates, qui pulvérisent sur une plus grande surface dans le mélangeur (voir *figure 26*).

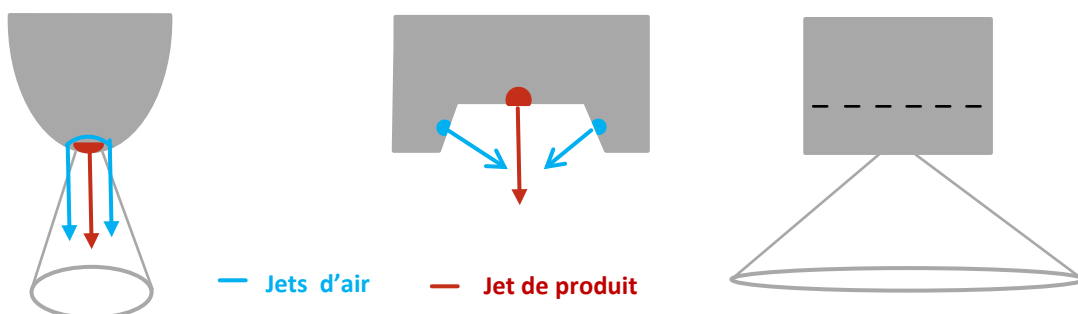


Figure 26 : Schéma d'une buse conique (à gauche) et d'une buse plate (à droite) vue de face et de profil

Il en est de même pour les aiguilles, celle présentes à la base sur les nouvelles buses sont plus larges que celles présentes sur les anciennes buses, il en résulte donc une pulvérisation plus



rapide du monomère dans le mélangeur. De nouvelles aiguilles plus fines ont donc été commandées afin de pouvoir pulvériser la quantité de monomère sur la durée la plus importante possible dans le but d'avoir un mélange d'une meilleure homogénéité.

## 2. Modification du circuit de pression

L'ancien système de pulvérisation n'était pas adapté au monomère à pulvériser, il a donc été modernisé. Ainsi, un réservoir sous pression a été installé afin de contenir le monomère à pulvériser et le circuit pneumatique a été modifié (voir *figure 27*), il comprend à présent 3 vannes de contrôle de la pression :

- une première permettant de mettre la cuve sous pression,
- une seconde afin de contrôler la pression au cours de la pulvérisation,
- et une dernière commandant la levée de l'aiguille de la buse.

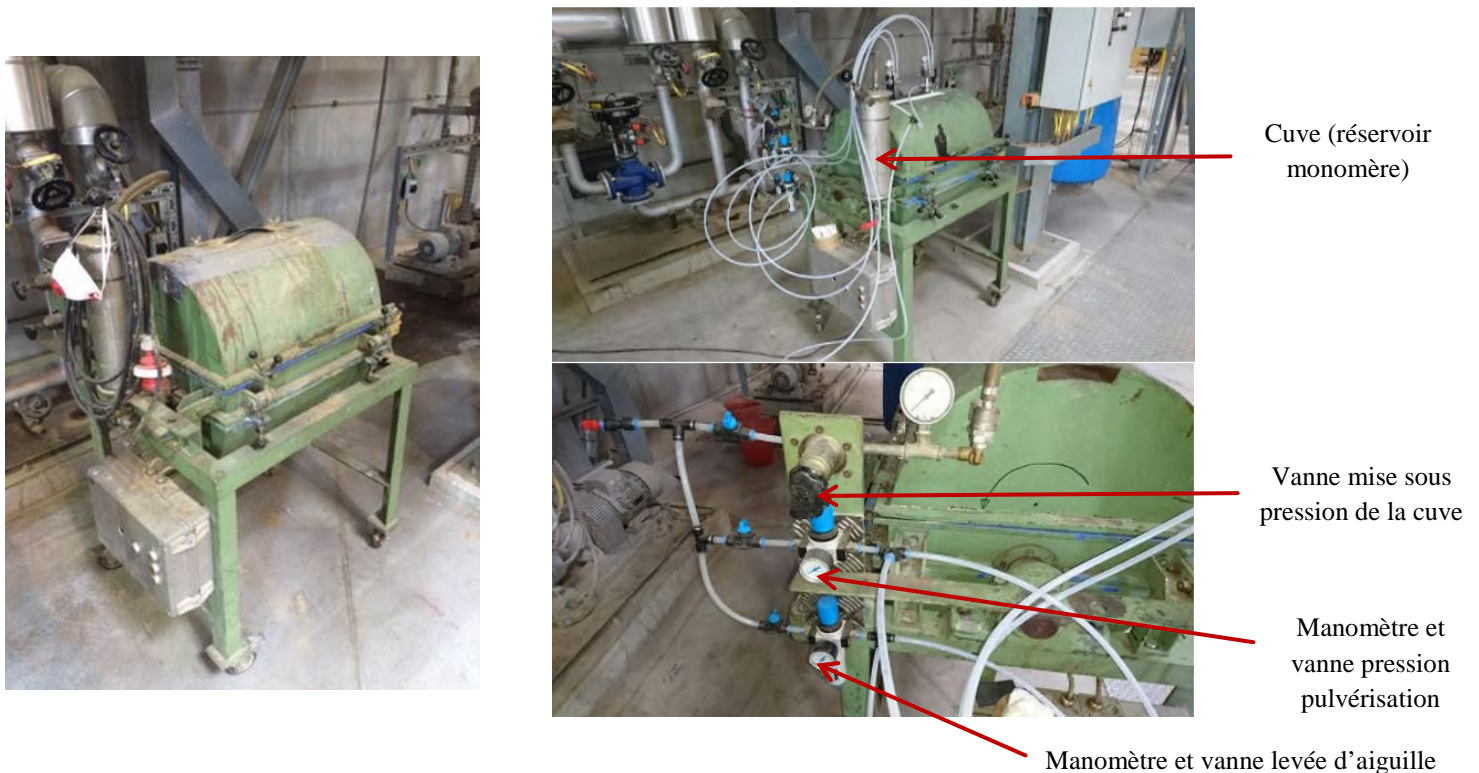


Figure 27 : Ancien (à gauche) et nouveau (à droite) circuit de pulvérisation

Tous les paramètres de ce nouveau circuit sont modifiables dans la limite du réseau d'air comprimé (0-7bars)

## 3. Expériences

Dans un premier temps, une première expérience (voir Annexe 2) a été réalisée par notre tuteur afin de tester le nouveau circuit de pression par le biais du contrôle de l'ouverture des anciennes buses de pulvérisation. Celles-ci consistaient simplement à pulvériser de l'eau, puis du monomère à l'aide du nouveau système de pulvérisation afin de déterminer, tout d'abord le débit en fonction de l'ouverture de l'aiguille, puis dans un second temps le débit de pulvérisation en fonction de la pression du produit.



On obtient pour la première expérience les résultats ci-dessous (Tableau 5 et figure 28) :

Tableau 5 : Résultats expérience sur le contrôle de l'ouverture de l'aiguille

Nombre de crans	Quantité d'eau (g)	Débit d'eau (g.s-1)
50	31,1	1,04
60	151,7	5,06
75	161,3	5,38
100	161,5	5,38
125	160,8	5,36
150	162,9	5,43
175	162,2	5,41

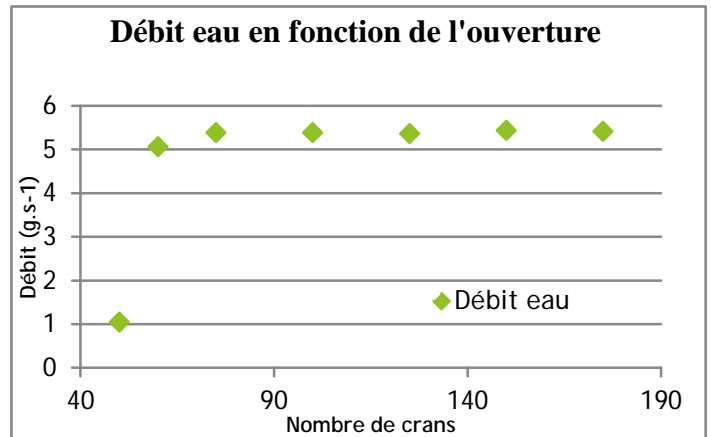


Figure 28: Tracé du débit en fonction de l'ouverture

On remarque alors sur la figure 3 que l'ouverture de l'aiguille s'effectue de manière binaire, sous une certaine pression de commande de l'aiguille elle est fermée, et au-dessus elle est en position ouverte.

Puis, une seconde expérience a été effectuée afin de comparer le débit de pulvérisation de l'eau et du monomère sur une durée de 30s, avec une pression de commande (contrôle de l'ouverture de l'aiguille) de 4 bars (Tableau 6 et figure 29) .

Tableau 6 : Résultats expérience sur les débits des produits:

Pression (bar)	Quantité (g)	Débit eau (g.s-1)	Débit monomère (g.s-1)
0,5	37,5	1,25	0
1	95,1	3,17	0
2	135,7	4,52	0,37
3	161,5	5,38	2,12

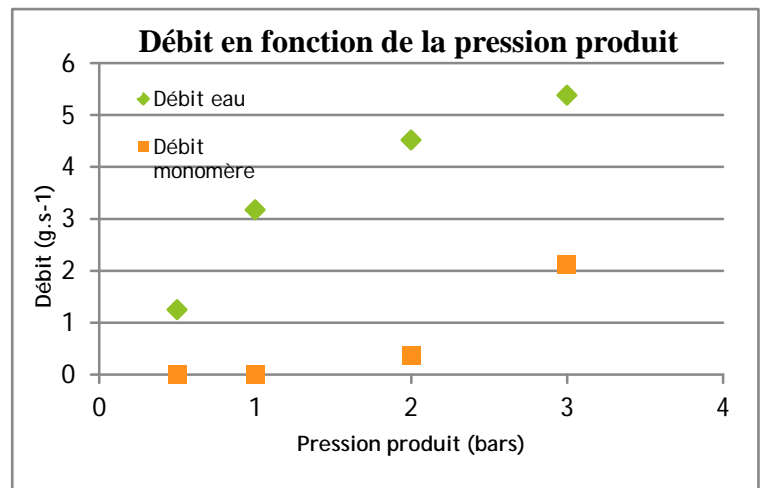


Figure 29 : Tracé du débit en fonction de la pression du produit

On remarque alors que le débit du monomère n'est pas du tout similaire au débit d'eau, ce qui est dû à la différence de viscosité entre les deux produits ( $\mu_{\text{eau}}=1.10^{-3}$  Pa.s alors que  $\mu_{\text{MDI}}=4.7.10^{-3}$  Pa.s). Les résultats des expériences sur l'homogénéité du mélange qui ont été réalisées avec l'eau ne seront pas représentatifs de la bonne répartition du monomère dans le mélange.

## B. Expérience sur l'homogénéité du mélange

Ainsi, après avoir réglé le problème des buses, nous avons pu nous pencher sur la question de l'homogénéité du mélange de fibres et monomère.

### 1. Quantité de fibres dans le mélangeur

Dans un premier temps, il est nécessaire de s'intéresser à la quantité de fibres à insérer dans le mélangeur, car en fonction de la masse de fibres, le mélange avec le monomère se fera plus ou moins bien.

Pour cela, notre tuteur a réalisé une première expérience (voir [Annexe 3](#)) en utilisant les nouvelles buses de pulvérisation et en faisant varier la quantité de fibres dans le mélangeur. Pour vérifier l'homogénéité du mélange, l'eau qui a été pulvérisée était colorée.

Dans un premier temps, le colorant qui a été utilisé était un colorant alimentaire, qui n'a pas donné de résultats : les fibres n'ont pas été colorées. Cependant, dans un second temps, le colorant alimentaire a été remplacé par de l'encre liquide d'imprimante, ce qui a permis d'obtenir des résultats plus concluants. En effet, les fibres ont bien été colorées lors des 3 expériences réalisées avec des remplissages différents (1000, 700 et 300g) ce qui indique que le mélange fibres et eau semble bien homogène. Cependant, étant donné les différences de viscosité entre l'eau et le MDI, il sera nécessaire de réitérer cette expérience avec du MDI coloré afin de déterminer si le mélange est réellement homogène.

De plus, cette expérience a permis de déterminer la bonne quantité de fibres à insérer dans le mélangeur : entre 700 et 1000g. Car, en dessous de 700g, la quantité de fibres est trop faible et on a une perte de liant qui est pulvérisée sur les parois, et au-dessus de 1000g, la fibre se comprime et forme des petits « tas » qui rend le mélange difficile (*Figure 30*).

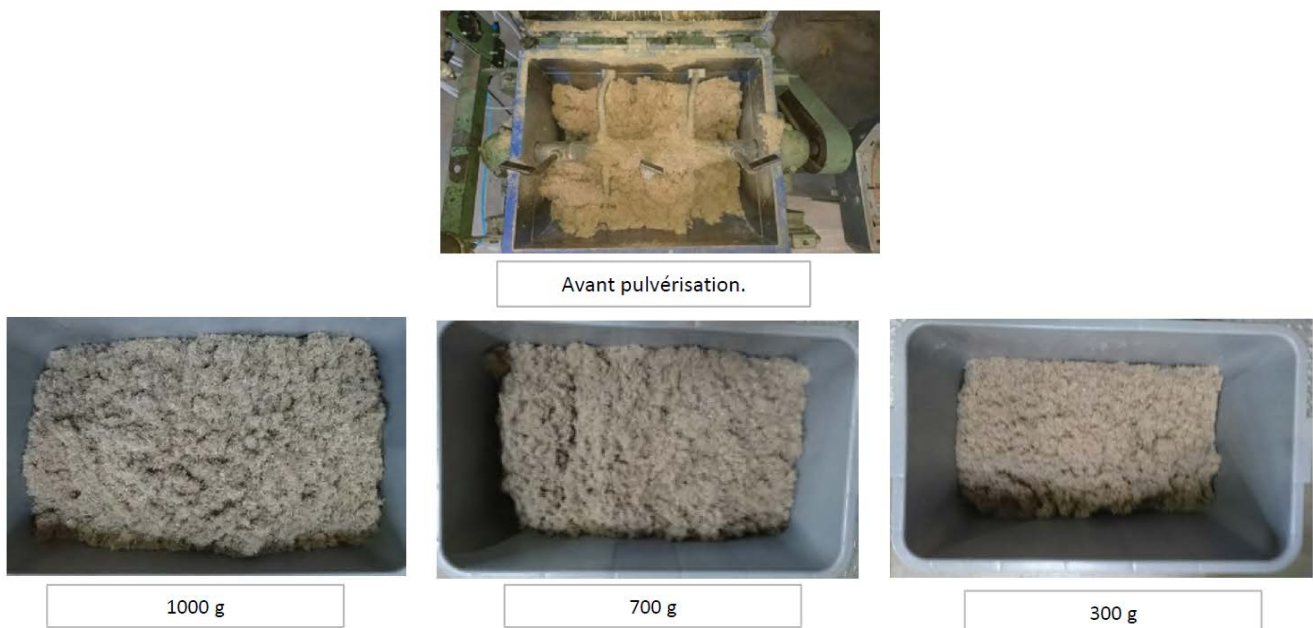


Figure 30 : Fibres avant pulvérisation (au-dessus) et résultats de la coloration pour les différentes masses de fibres insérées

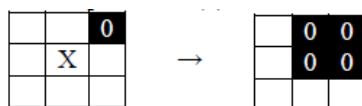
## 2. Vérification de l'homogénéité du mélange

### a) Principe du traitement d'image

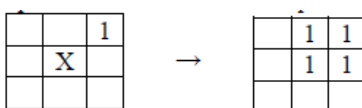
L'image prise par une caméra ou un appareil photo est une image numérique qui est constituée de pixels qui contiennent de nombreuses informations telles que la couleur et l'intensité lumineuse. Pour réaliser l'opération de traitement d'image, il est tout d'abord nécessaire de passer l'image en couleur, en image en niveau de gris variant de 0 à 255 (teinte du gris). Puis, une étape de seuillage est effectuée consistant à transformer l'image niveau de gris, en image binaire. Le principe du seuillage est relativement simple, si un pixel à une valeur d'intensité supérieure au seuil, il prendra la valeur 255 (blanc) et si un pixel à une intensité inférieure au seuil il prendra la valeur 0 (noir), et on obtient alors simplement une image en noir et blanc.

Cette image binaire, contient alors encore des informations superficielles qui sera nécessaire d'éliminer, et d'autres informations cachées à révéler. Ces opérations sont alors réalisées en utilisant différents opérateurs morphologiques comme :

- l'érosion, qui permet de réduire le blanc de l'image,



- la dilatation, qui permet d'augmenter le blanc de l'image,



- l'ouverture, qui correspond à une érosion puis une dilatation, avec une ouverture on perd de l'information sur l'image (on a plus de noir après l'opération qu'avant),

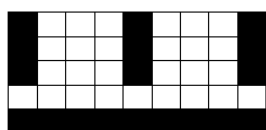
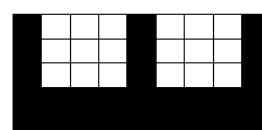


image originale



après érosion



après érosion puis dilatation

- la fermeture, qui correspond à une dilatation puis une érosion, avec une fermeture on gagne de l'information (on a plus de blanc après l'opération qu'avant).

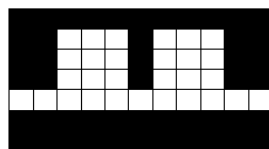
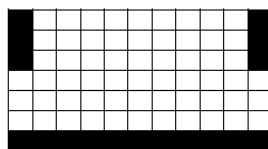
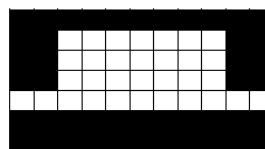


image originale



après dilatation



après dilatation puis érosion

Ces opérations permettent alors d'éliminer le « bruit » et les informations non nécessaires sur l'image afin de n'en garder, par exemple dans notre cas, simplement les fibres teintées de l'image, ce qui nous donne alors une idée de la répartition des fibres colorées dans le mélangeur. [20]

## b) Expériences

Nous avons tout d'abord réalisé une expérience (voir Annexe 4) en colorant une partie des fibres avec de l'encre noire d'imprimante que nous avons insérées dans différents endroits dans le mélangeur avec des fibres non teintées (*Figure 31*).



Figure 31 : Fibres teintées et non teintées en place dans le mélangeur avant mélange

Dans un premier temps, nous avons tout simplement cherché à savoir si le mélange s'effectuait correctement avec une méthode très simple : à la fin du mélange, on vérifiait si l'on retrouvait des fibres colorées un peu partout dans le mélangeur. Et en effet, nous avons remarqué qu'après l'opération, nous retrouvions bien des fibres teintées partout dans le mélangeur, ce qui laisse donc penser que le mélange s'effectue correctement (*Figure 32*).

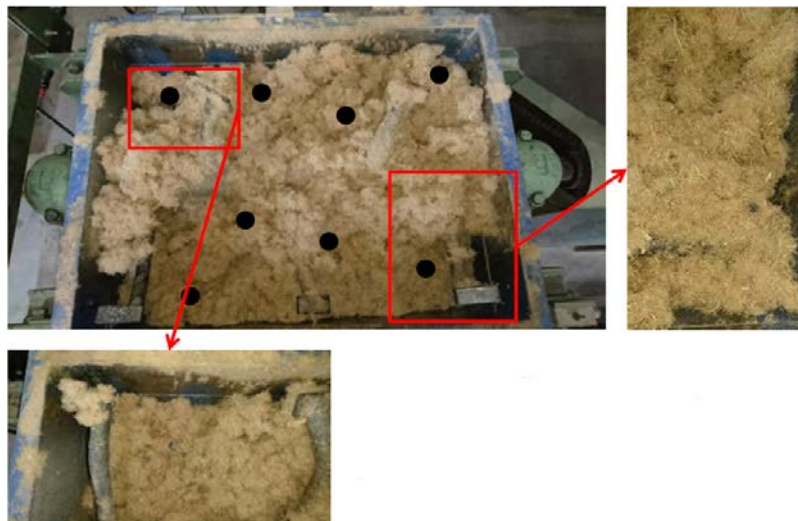


Figure 32 : Fibres teintées et non teintées dans le mélangeur après le mélange

Pour mettre en évidence ce résultat, nous avons donc dans un second temps envisagé d'utiliser le traitement d'image car dans le cadre des mélanges des solides divisés, il permet de caractériser l'homogénéité du mélange réalisé. Ainsi, nous nous sommes servis d'une caméra endoscopique que nous avons disposée à la place d'un emplacement pour une buse de pulvérisation. Nous avons alors essayé de réaliser une vidéo au cours du mélange des fibres sans ajout de monomère, afin d'utiliser des captures pour réaliser le traitement d'image. Cependant, lors des essais de vidéos, au moment du mélange l'image de la caméra n'était pas claire du tout, on y voyait simplement un nuage de fibres voler dans le mélangeur. Cela peut être dû à la résolution de la caméra ou bien de la vitesse de rotation trop importante du mélangeur qui engendre alors un mouvement des poussières. Nous n'avons donc pas pu nous

servir de cette vidéo, mais elle nous aura permis de constater une seconde fois que le mélange semblait visuellement correct.

Pour remédier à ce problème et confirmer nos suppositions, l'idéal aurait été de réaliser une photo avant le début du mélange, puis de lancer le mélange et de l'arrêter à différents temps afin d'effectuer plusieurs photo au cours du mélange, que nous aurions alors pu analyser. Ces différentes images auraient pu par la suite être traitées avec un logiciel de traitement d'image comme « Visilog » ou bien à l'aide d'images développées sous Matlab avec l'outil "Image Processing Toolbox".

### 3. Pulvérisation de monomère coloré

Etant donné que l'expérience réalisée au préalable avec de l'eau colorée ne permettait pas de représenter réellement le comportement du monomère au cours de la pulvérisation. Il a fallu effectuer à nouveau cette expérience en colorant le monomère (voir [Annexe 5](#)). Pour cela, il a été nécessaire de trouver un colorant permettant de teinter le monomère (de couleur brune) de manière efficace.

L'entreprise PAVATEX possède déjà un colorant fourni par le même fournisseur que le liant monomère ((Dow). Cependant, celui-ci n'étant pas miscible avec l'eau, et donc plus compliqué à nettoyer, nous avons donc aussi testé un second colorant, fourni par notre tuteur à l'école, la Rhodamine B (*Figure 33*). C'est un puissant colorant fluorescent (il émet de la lumière après avoir été excité par une source lumineuse) sous forme de poudre rose.

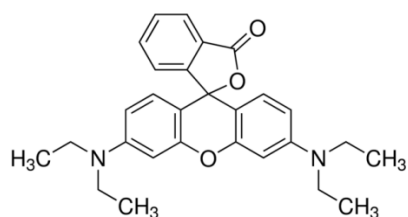


Figure 33 : Formule topologique de la Rhodamine B [21]

On remarque sur la photo ci-dessous que les 2 colorants teintent de manière efficace le monomère (*Figure 34*). Cependant, après pulvérisation, le colorant vert ne teinte pas suffisamment la fibre dans le mélangeur pour une comparaison à l'œil nu.



Figure 34 : A gauche, monomère colorant avec le colorant du fournisseur et à droite le monomère coloré avec la Rhodamine B

C'est donc avec la Rhodamine B que l'on constate le plus facilement le changement de coloration des fibres. Ainsi, cette expérience nous a permis de constater la bonne répartition



du liant dans le mélangeur, car on remarque que l'ensemble des fibres de bois a été teinté en rose (*Figure 35*).



Figure 35 : A gauche fibres avant pulvérisation et à droite fibres après pulvérisation de liant coloré avec la Rhodamine B

## II. Expériences sur la presse

### A. Comparaison de deux protocoles de pressage

#### 1. Ancien protocole de pressage

Le pressage s'effectuait en premier lieu d'une façon directe : les fibres mélangées et imprégnées de liant étaient mises dans la presse et pressées directement en une seule fois. Ce procédé avait l'avantage d'être particulièrement rapide. Cependant, il ne représentait nullement les conditions de pressage au niveau de la ligne principale. En effet sur la ligne pilote les tapis de fibres sont tout d'abord pré-pressés, s'en suit un temps de repos, avant d'être à nouveau pressés. Au cours des 2 phases de pressage, la force appliquée sur le tapis de fibres est la même.



Figure 36 : Ancien protocole de pressage

De précédentes expériences réalisées par notre tuteur, afin de déterminer le profil de densité des panneaux réalisés sur la ligne pilote, donnaient des résultats avec des écarts de l'ordre de 30% en densité entre le dessus (plus dense) et le dessous (moins dense) du panneau. Ce qui n'est bien évidemment pas représentatif du profil de densité des panneaux de la ligne industrielle et qui doit être corrigé.

#### 2. Nouveau protocole de pressage

Ainsi, en raison des résultats incohérents obtenus avec le précédent protocole, nous avons donc envisagé avec notre tuteur, de déterminer et tester un second protocole plus représentatif de la ligne industrielle. Pour cela, nous avons ajouté, avant l'étape de pressage, une étape de pré-pressage, qui est déjà présente sur la ligne industrielle. Cette étape de pré-pressage a pour but de favoriser la bonne homogénéité des fibres. Car au cours du pré-pressage en l'absence

de vapeur permettant la polymérisation du monomère, les fibres s'organisent et s'accrochent entre elles, ce qui permet de donner une certaine cohésion au panneau.

Par conséquent, le nouveau protocole comprend tout d'abord une phase de pré-pressage, puis un temps de repos, puis une phase de pressage. La force appliquée au cours de ces deux phases de pressage.



Figure 37 : Nouveau protocole de pressage

Cependant, il paraissait aussi que la mise en place des fibres imbibées dans la presse n'était pas réellement équitable, en effet cette répartition se fait à l'œil. Ce qui peut aussi expliquer des écarts de densité au sein des panneaux. Nous avons donc pensé ajouter une grille au moment de la mise en place des fibres dans la presse qui permettrait de répartir au mieux les fibres.

Pour cela, la quantité totale de fibres imbibées serait répartie en différentes fractions qui seraient chacune mise dans un des carreaux de la grille (Figure 38).

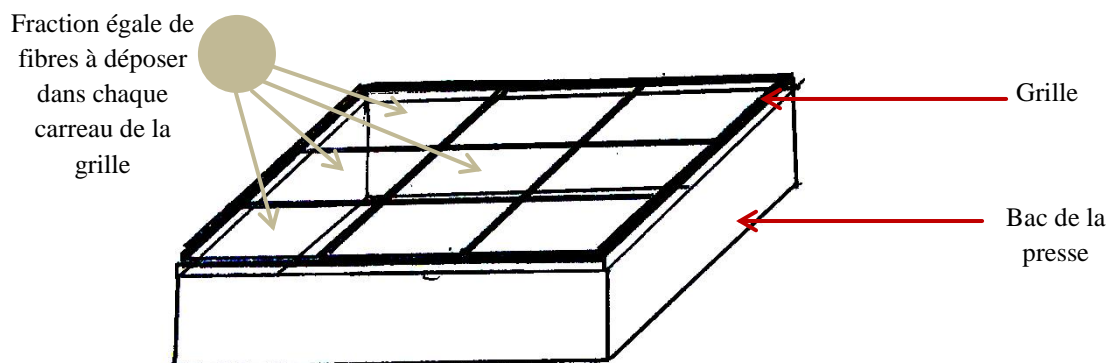


Figure 38 : Ajout d'une grille sur le bac de pressage

## B. Nouveau modèle de presse

En réalité le principal problème lors du pressage provient du non parallélisme des plaques lors de l'application de l'effort. C'est la raison pour laquelle nous avons entrepris de proposer un nouveau modèle de presse plus efficace et fidèle aux conditions opératoires réelles de la ligne industrielle tout en gardant à l'esprit les principaux critères de sécurité.

### 1. Modélisation 3D de la nouvelle presse sur Solidworks

La presse a été remodelisée dans l'objectif de réduire d'intervention de l'opérateur. Des considérations purement fonctionnelles ont également été prises en compte. La première contrainte était d'éliminer le phénomène d'arc-boutement lié à la répartition non uniforme de la fibre à presser ainsi qu'au non stigmatisme du système de pressage qui ne comportait qu'une

tige liée à un vérin. La deuxième contrainte étant naturellement de garder un fonctionnement correct du dispositif tout en optant pour la solution la plus simple à mettre en œuvre.

Compte tenu des efforts développés lors du pressage, la plaque du haut a été repensée dans l'objectif de résister au mieux aux sollicitations répétitives. La plaque étant creuse, l'ajout de piliers de renforcement dans la partie creuse (*Figure 40*) a été nécessaire. La forme de la partie mobile a dans l'ensemble été spécifiquement déterminée pour réduire les risques de pincement lors de la descente du vérin.

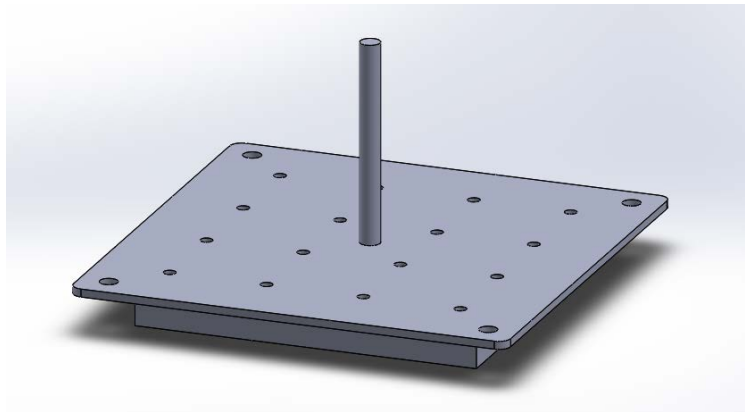


Figure 39 : Partie solide au vérin

Les trous de petite taille permettent l'évacuation de la vapeur sortant du panneau lors du pressage. Il convient de noter par ailleurs que les congés sur les quatre bords de la pièce sont importants ; leur omission représente un risque de blessures relativement graves.

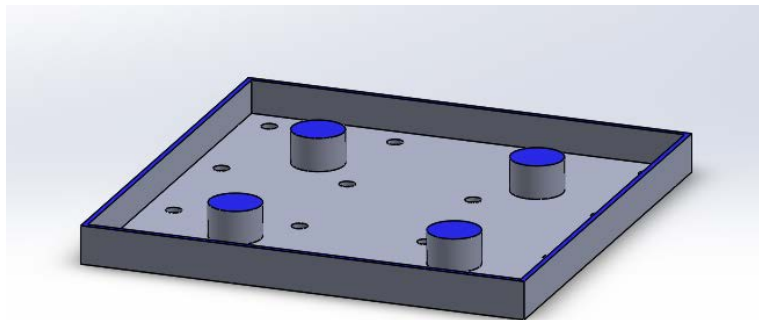


Figure 40 : Vue de coupe

On remarque un gain en volume considérable sur la partie creuse ci-dessus. Étant donnée la masse volumique de l'acier, le gain en masse est tout aussi important. La disposition de ces piliers coupés en bleu est validée par le biais d'une simulation éléments finis qui est développée dans la partie suivante (voir *figure 42*).

La partie inférieure de la presse est fixe et est directement soudée au bâti. Ce même bâti n'est autre que les quatre tiges qui orientent le glissement de la partie du haut. La plaque du bas est trouée et permet l'arrivée de la vapeur nécessaire à la polymérisation des fibres.



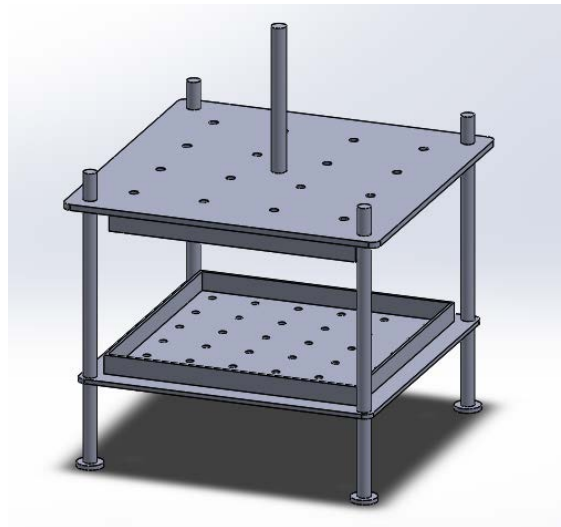


Figure 41 : Représentation de l'assemblage

## 2. Tenue mécanique

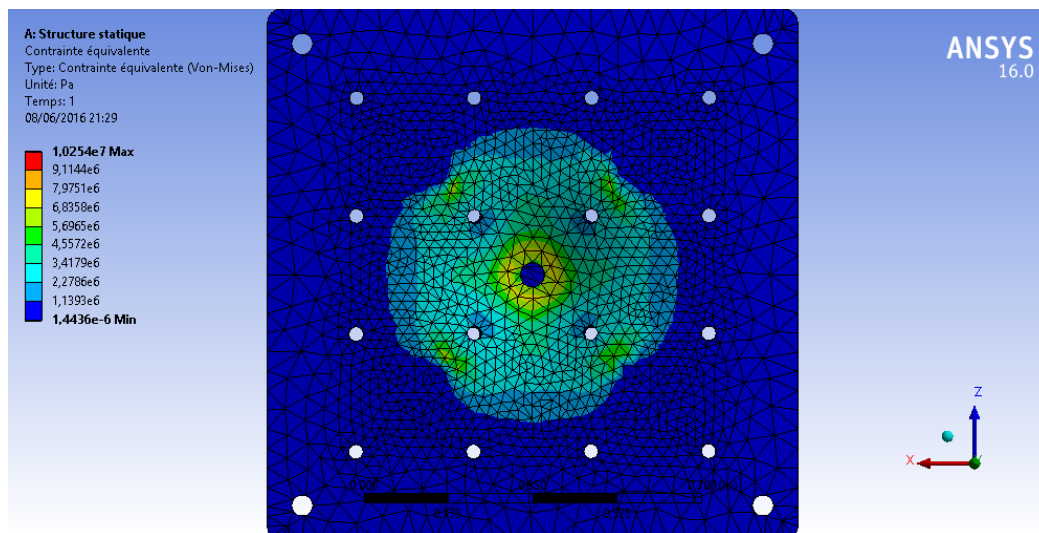


Figure 42 : Simulation statique par éléments finis

La capture ci-dessus illustre la répartition de la contrainte équivalente de Von-Mises dans la plaque mobile. Comme la sollicitation nominale est atteinte lorsque la fibre est à un taux de compression maximal, cette situation a été considérée comme l'état de changement le plus défavorable.

Réglage de l'analyse :

- La contrainte appliquée est de 1000 N en compression.
- La condition aux limites porte sur le dessous de la plaque qui est en appui direct avec la fibre pressée, cette partie est alors considérée comme étant fixe.
- Le matériau utilisé est un acier inoxydable.

Analyse du résultat :

- La plaque n'atteint pas le seuil plastique étant donné que la limite élastique de l'acier se situe entre 200E6 et 900E6 MPa.
- La contrainte est bien répartie là où sont placées les quatre colonnes de soutiens situés à l'intérieur de la plaque.
- Le phénomène de concentration des contraintes reste négligeable car les trous pour l'évacuation de la vapeur n'ont pas d'impact sur le champ des contraintes.

Ainsi, cette simulation nous permet de valider notre choix de mettre des colonnes de support au sein de la plaque. Elle permet aussi de tester la résistance de la plaque à une contrainte type de 1000 N qui en l'occurrence s'avère être excellente et permet même d'envisager une réduction des dimensions si les contraintes appliquées sont bien inférieures aux 1000 N de l'analyse.

### **III. Amélioration de la sécurité de la ligne pilote**

La sécurité de la ligne pilote est l'une des questions plus importantes à traiter. Le risque plus important de ce procédé est la suspension particules de MDI dans l'air, car la surexposition au MDI présente de réels dangers pour la santé. Pour améliorer la sécurité il est indispensable d'avoir des données sur les teneurs de monomère dans l'air. Par la suite on pourra expliquer comment il est possible de mesurer la quantité de monomère dans l'air.

#### **A. Vérification de la teneur de monomère dans l'air**

##### **1. Mesures de la teneur en monomère**

Avoir connaissance de la teneur de monomère dans l'air est le facteur plus important concernant la sécurité de la ligne pilote. En effet, les vapeurs de monomère étant particulièrement nocives, il est nécessaire d'assurer la sécurité des utilisateurs. Pour cela, un intervenant extérieur, la société IRH, muni d'un détecteur d'isocyanates a été chargé de mesurer ces teneurs en MDI aux abords de la ligne pilote.

Le groupe IRH Environnement est une société indépendante experte en conseil sur l'environnement et en risques environnementaux dans plusieurs domaines (air, déchets, eau potable, eaux pluviales, énergie, etc.). Dans notre cas est la qualité de l'air qui sera analysée pendant la semaine du 6 au 11 de juin pour des analyses de poussière ainsi que pour discuter des vapeurs de PMDI. Par conséquent, les résultats de ces analyses ne sont pas disponibles au moment de livraison de ce rapport. [22]

##### **2. Fonctionnement du détecteur**

Ce détecteur d'isocyanates (voir *figure 43*) fonctionne à partir d'une cassette de papier traitée chimiquement réagissant uniquement avec une famille de gaz en particulier. Lorsque la cassette est exposée à l'air contaminé par le monomère, elle change de couleur de façon proportionnelle à la quantité de gaz ciblé présente. Ces changements de couleur sont contrôlés

continuellement grâce à un système de détection électro-optique qui détermine la quantité de lumière réfléchie du papier.

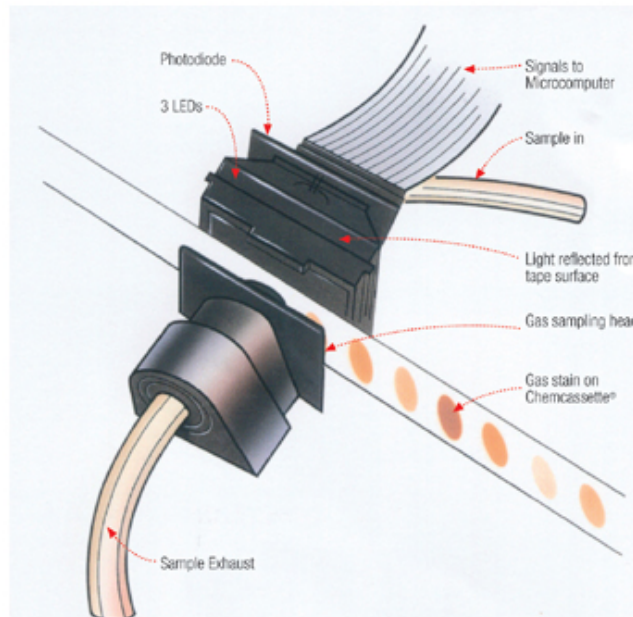


Figure 43 : Schéma du Chemcassette *Source spécifiée non valide.*

Les cassettes de papier sont calibrées et vérifiées à l'usine et après cela elles requièrent simplement un lavage et une revérification hebdomadaire ou mensuelle. Le coût du lavage est minimal, et une carte de vérification est fournie avec la cassette. Le temps nécessaire à la revérification est de l'ordre de 5-10min. D'autres part, les facteurs pouvant affecter et détériorer les capteurs sont en particulier l'humidité, le vent et les températures extrêmes. [23]

## B. Amélioration de la sécurité des éléments de la ligne pilote

Comme nous l'avons vu précédemment, l'amélioration de la sécurité de machines se base tout d'abord sur une étude de gestion des risques visant à déterminer les phénomènes dangereux liés à la machine afin d'estimer par la suite le risque : son importance, sa probabilité d'occurrence, la fréquence, la durée d'exposition au risque, ... afin d'en trouver une solution. Cette démarche est donc itérative afin de s'assurer que les mesures de sécurité améliorent réellement la sécurité de la machine, sans introduire de nouveaux risques. [24]

### 1. Risques mécaniques

Dans un premier temps, il est intéressant de se pencher sur les phénomènes pouvant conduire à des blessures par l'action mécanique de certains éléments en mouvement de la machine. On peut les qualifier de risques d'écrasement, de cisaillement, de chocs, d'abrasion, etc...

Tout d'abord, en ce qui concerne le mélangeur le principal risque mécanique se situe au niveau de la fermeture, l'utilisateur présente un risque d'écrasement en y laissant sa main au cours de la fermeture.

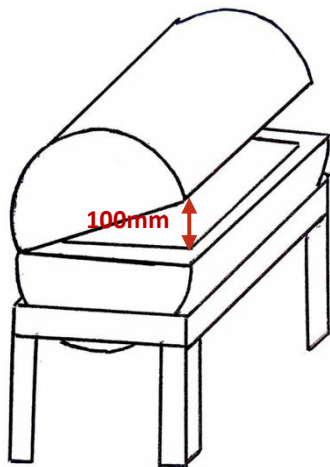


Figure 44 : Schéma du mélangeur avec l'écartement minimal de l'ouverture

Ainsi, si l'on se base sur des données reprises de la norme NF EN 349+A1 « Ecartements minimaux pour prévenir les risques d'écrasement de parties du corps humain » afin d'éviter l'écrasement et le cisaillement la distance minimale entre les pièces en mouvement est de :

- 25mm pour un doigt,
- 100mm pour une main.

Etant donné que le risque de placer sa main entre les deux parties mobiles est envisageable, il serait donc préférable afin de rendre le mélangeur plus sûr de respecter l'écartement de 100mm au niveau de l'ouverture du mélangeur.

En ce qui concerne la presse actuelle, le principal risque mécanique était un risque d'écrasement lors de la mise en place de la plaque pressante. Ce qui a été corrigé dans le nouveau modèle pour la presse. Cependant des vérins ont été ajoutés et un faible risque de pincement au cours du pressage reste présent, bien que ce ne soit plus l'utilisateur qui met en place la plaque. Ainsi, si l'on se confère à la norme NF EN ISO 13857 (paragraphe 4.2.2), une distance minimale de la presse sera à respecter au moment du pressage.

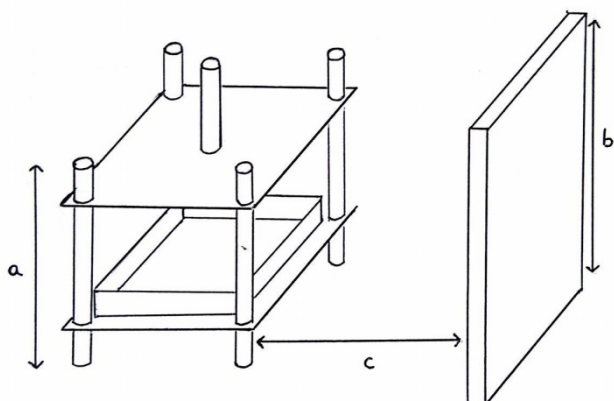


Figure 45 : Schéma de la nouvelle presse avec le mur de protection et les distances

Ainsi, dans le cas de notre presse la hauteur où se situe le phénomène dangereux est de l'ordre de :  $a \approx 1400\text{mm}$ , donc en se basant sur le *Tableau 7* en *Annexe 6*, si on choisit une hauteur de structure de protection  $b=1200\text{mm}$ , cette protection devra être placée à une distance de  $c=1000\text{mm}$  de la presse. [25]

## 2. Risques dus aux émissions de poussières et vapeurs de monomère

D'autre part, la manipulation de fibres de bois génère une grande quantité de poussières de bois que nous avons pu constater lors de nos visites. De plus, les vapeurs de monomère étant aussi toxiques, il est nécessaire de s'intéresser aux moyens de protection respiratoire pour les usagers.

Dans un premier temps en ce qui concerne les poussières de bois, celles-ci figurent sur la liste des procédés cancérogènes depuis un arrêté du 5 janvier 1993. En effet, l'exposition à ces poussières peut conduire, tant à des maladies à court terme (irritations de la peau et des

muqueuses, eczéma, asthme, ...), qu'à des maladies à long terme pouvant être très graves et provoquer des lésions définitives (fibrose pulmonaire, cancers naso-sinusiens, ...). Il est donc nécessaire de pouvoir s'en protéger. Pour cela, il est nécessaire de connaître la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) qui pour les poussières de bois est de  $1\text{mg}/\text{m}^3$ . En effectuant des mesures aux abords de la ligne pilote, il nous serait alors possible de déterminer si cette réglementation est bien respectée. [26]

De la même manière, le monomère MDI étant aussi classé comme cancérigènes et mutagène, des mesures au niveau de la ligne pilote permettrait de déterminer si la quantité présente dans l'air est supérieure à la VLEP qui est de  $0,1\text{mg}/\text{m}^3$ . [27]

Ainsi, il nous serait possible d'évaluer la nécessité d'ajouter un système de ventilation (hotte aspirante) au-dessus de la ligne pilote.

Dans un second temps, en ce qui concerne les appareils de protection respiratoire, étant donné que lors de l'utilisation de la ligne pilote la teneur en oxygène reste normale et que nous sommes en présence de poussières (bois) et de vapeurs (monomère), nous avons trouvé les deux tableaux (*Tableau 8* et *Tableau 9* en Annexe 7) qui permettent de choisir l'appareil adapté à la situation (demi-masque filtrant, masque complet, casque, ...). Cependant, afin d'effectuer un choix il est nécessaire de connaître les concentrations des substances étudiées, ce qui permet alors de déterminer le facteur évaluant le dépassement de la valeur limite d'exposition. Cela pourrait aussi être effectué en utilisant les valeurs de mesures effectuées à proximité de la ligne pilote. [28]

En revanche, ces mesures n'ont pas pu être effectuées au cours du projet. Cette partie permet donc de donner des pistes afin d'améliorer la sécurité sur ce point.

## Partie 3 : Gestion de projet

### A. Rappel du périmètre du projet

#### 1. Contexte, enjeux du projet et périmètre du projet

L'entreprise PAVATEX, installée à Golbey depuis 2013 produit des panneaux isolants en fibres de bois. Elle possède en plus d'une ligne industrielle, une ligne pilote. Celle-ci permet alors de tester les différentes innovations des laboratoires sur une échelle plus importante que l'échelle du laboratoire sans pour autant être à l'échelle industrielle.

Cependant, le matériel utilisé sur la ligne pilote est relativement précaire et vieillissant, le but de ce projet est donc de chercher à optimiser les deux éléments de la ligne pilote : le mélangeur et la presse.

Les enjeux du projet sont donc :

- l'amélioration du mélangeur, c'est-à-dire déterminer si le mélange des fibres de bois et du liant monomère se fait de manière homogène (donc une bonne répartition de liant sur les fibres)
- l'amélioration du système de pressage, car celui-ci est dangereux et ne permet pas d'obtenir des panneaux de fibres qui sont homogènes en terme de densité.
- la sécurisation de la globalité de la ligne pilote, en raison du monomère dont les vapeurs sont particulièrement toxiques, et de la sécurité au niveau des machines pour les utilisateurs (pincement, ...).

Ce projet étant particulièrement complet, nous nous sommes donc tout d'abord penchés sur des recherches bibliographiques sur l'ensemble des éléments de la ligne pilote. Puis, en accord avec nos tuteurs, penchés sur le point de l'optimisation du mélangeur avant de s'intéresser à la presse. Car la production d'un panneau sur la ligne commence par le mélange des fibres de bois et du liant monomère, il est donc la base de la conception d'un panneau réussi. Par la suite nous nous sommes intéressés à la sécurité et à l'optimisation de la presse.

#### 2. L'équipe projet

Nous sommes 4 étudiants en 3<sup>ème</sup> année à l'EEIGM (Ecole Européenne d'Ingénieurs en Génie des Matériaux) : Alejandro SIMÓ VESPERINAS, Ayoub ELGHANI, Ayoub BOUHADDIOUI et Pauline LEVÉRONE.

Alejandro a été nommé chef de projet car il nous a semblé le plus apte à ce poste. Ayoub E. s'est quant à lui occupé de la communication et Ayoub B. de l'organisation de la documentation. Finalement, Pauline s'est chargée de la prise de notes lors des réunions et visites afin d'en faire des comptes rendus, de la mise en commun des parties de rapport rédigées, et de la mise en page du rapport.

Nous avons aussi 2 tuteurs, notre tuteur académique Mr. Guo-Hua HU, enseignant-chercheur de l'Université de Lorraine et notre tuteur industriel Mr Thierry THOMAS, ingénieur procédé chez PAVATEX.

### **3. Contraintes, limites et livrable du projet**

Tout d'abord, l'entreprise PAVATEX se situant à 66km de l'école, et n'ayant pas l'autorisation de nous déplacer par nos propres moyens au début du projet, nous n'avons pas eu l'occasion d'aller visiter l'entreprise avant la fin du mois de novembre. Par la suite, nous n'avons pu nous rendre sur place qu'à de rares occasions.

D'autre part, étant donné que nous sommes limités dans le temps (le rapport du projet devant être livré le 13 juin 2016), et que le projet est très complet, nous ne sommes pas sûr de pouvoir traiter l'ensemble des enjeux de manières égales, et donc nous nous intéresserons plus particulièrement à certains points.

Finalement, le livrable du projet doit contenir une partie théorique rassemblant toutes les informations bibliographiques que nous avons pu trouver, une partie expérimentale qui développe les démarches pratiques que nous avons effectuées, et qui donne des pistes d'amélioration de la ligne pilote, et enfin cette partie de gestion de projet.

## **B. Méthodes et outils déployés**

### **1. Structure est organisation**

En ce qui concerne l'organisation de ce projet, nous avons utilisé un diagramme de Gantt qui est un outil efficace nous permettant de visualiser son avancement. Il représente un planning des différentes tâches qui sont à effectuer avec une estimation du temps nécessaire à consacrer à chacune des phases et sous-tâches.

Il nous a donc aidés à orchestrer au mieux les différentes recherches et expériences que nous avons à réaliser, et il nous a permis de visualiser les différents jalons associés au projet (réunions ou visites programmées, rendu de rapports, soutenances, ...).

Nous n'avons pas utilisé de Product Breakdown Structure (PBS), cependant nous avons tout de même divisé notre projet en sous-projets, tâches, et sous-tâches afin de structurer notre diagramme de Gantt.

Ce diagramme de Gantt est disponible en Annexe 8.

### **2. Pilotage global**

Au démarrage du projet, nous avons choisi de créer une adresse e-mail commune à tous les 4 acteurs du projet (gm.pavatex@gmail.com), ce qui nous a permis d'avoir des contacts avec nos tuteurs par le biais d'une boîte mail centralisée. Chacun pouvait donc y avoir accès afin de se tenir informé. S'en est suivi la création d'un espace de travail partagé (Google Drive) afin de pouvoir mettre en commun toutes les informations que nous avons trouvées. Celui-ci nous a été très utile, car chacun avait accès à toutes les sources, aux comptes rendus de visite, de réunion, ...

De plus, nous avons aussi réalisé une note de cadrage qui nous permet de cerner le projet (objectifs, jalons, attente du tuteur, ...). Celle-ci est disponible en Annexe 9.



D'autre part, nous avons au préalable organisé les différentes réunions avec nos tuteurs afin de mettre au clair les différentes questions que nous avons à leur poser et les réponses que nous avons à leur apporter. Cela dans le but de gérer au mieux le temps lors des réunions afin d'obtenir le plus de réponses à nos interrogations. Au cours de ces réunions, des notes ont été prises afin de réaliser des comptes rendus pour pouvoir en conserver une trace écrite. Deux exemples de compte-rendu sont disponibles en Annexe 10.

### C. Points de vigilance solutionnés

Nous avons eu un peu de mal à démarrer le projet, en raison du manque d'informations que nous possédions. En effet, avant notre première visite, nous n'arrivions pas réellement à imaginer la ligne pilote, car nous n'avions pas pu avoir de photos avant la première visite de Mme SIMONNOT et Mr HU qui a précédé la notre. Ainsi, nos premières recherches n'ont pas été très fructueuses car elles n'avaient pas d'objectif précis (informations sur les mélangeurs, sur le monomère, ...). Il a donc été nécessaire de renforcer nos recherches après la visite, afin d'apporter toutes les précisions qui nous manquaient.

De plus au début de nos recherches, nous avons rencontré un problème d'organisation. Étant donné que nous ne savions pas encore réellement sur quoi cibler nos recherches, nous avons tous commencé à effectuer des recherches sur les mêmes thèmes. Ce problème a été résolu en se concertant et en répartissant chacun nos tâches lors de la réalisation du diagramme de Gantt.

D'autre part, nous avons rencontré le problème du déplacement pour se rendre chez PAVATEX. Au cours du premier semestre, un enseignant devait nous emmener sur place. Cependant ce problème a été résolu au cours du second semestre, car l'école nous a autorisé à nous rendre à Golbey avec nos voitures personnelles.

### D. Démarche globale

Globalement, nous avons essayé d'adopter une démarche professionnelle afin de répondre au mieux aux attentes de notre tuteur industriel. Pour ce faire, nous avons eu de nombreux échanges avec nos tuteurs, tant au cours des réunions et visites, que par e-mail, et nous avons profité au maximum de toutes les informations et conseils qu'ils pouvaient nous fournir. Pour cela, notre tuteur industriel nous a été d'une grande aide car il nous a proposé de nombreuses pistes, il a été très attentif à nos propositions et il a accepté de réaliser les expériences dont les protocoles avaient été déterminés au cours de nos diverses réunions.

D'autre part, nous avons aussi pris du recul par rapport aux informations que nous avons pu obtenir au cours des nombreuses recherches afin de rester objectifs. Car souvent les résultats de nos recherches ne s'appliquaient pas directement à notre projet, et nous devions garder un œil critique afin de les comprendre et de pouvoir les utiliser dans le cadre du projet.

### E. Retour d'expérience

Ainsi, ce projet nous a permis d'avoir une première approche du métier d'ingénieur par le biais d'un projet en lien direct avec l'industrie. Nous avons ainsi pu mettre en pratique certaines de nos connaissances, mais nous avons surtout acquis de nombreuses notions



scientifiques en relation avec notre sujet notamment grâce aux recherches et expériences que nous avons effectuées. De plus, il nous a aussi permis de faire naître un certain professionnalisme, car nous n'étions pas simplement en contact entre nous, mais nous avions affaire à deux tuteurs qui avaient des attentes auxquelles nous devons répondre afin de mener à bien le projet.

Il nous a aussi apporté une nouvelle expérience de travail en groupe sur un projet de longue durée, ce qui nous a permis d'améliorer notre organisation et communication, au sein du groupe. De plus, ce projet a aussi contribué à notre savoir-être car dans un groupe il est nécessaire que chacun sache écouter les propositions des autres, mais aussi que chacun sache tirer de ses erreurs des moyens pour s'améliorer et s'adapter aux changements.

D'autre part, étant donné que notre tuteur industriel est lui-même ingénieur, cela nous a permis de visualiser le travail auquel nous serons tous les quatre confrontés à la fin de nos études.

Finalement, ce projet a été particulièrement intéressant pour nous car il nous a réellement permis de nous immiscer dans la peau d'un ingénieur exerçant dans des conditions réelles son métier. Ceci nous a ouvert les yeux sur les réalités du métier qui consistent à prendre plusieurs paramètres en considération tous aussi importants les uns que les autres (budget, temps, relation avec les autres par exemple). Nous avons entre autres eu l'avantage d'avoir une équipe soudée, ce qui a considérablement joué en notre faveur et nous a permis d'avancer de façon sûre et réfléchie.

## Conclusion

Ces recherches nous ont ainsi permis de parcourir et de récolter un large panel d'informations à propos des éléments de la ligne pilote (presse, mélangeur, liant,...), de leur fonctionnement ou bien encore de leurs risques. Mais elles nous ont aussi permis d'appréhender une certaine procédure universelle afin de réduire ces risques ou encore une méthode statistique visant à optimiser les expériences envisageables. Ces informations nous apportent ainsi l'essentiel afin de pouvoir aborder au mieux les problèmes liés à l'optimisation de la ligne pilote (homogénéité du mélange et du pressage) et donc de répondre le mieux possible aux attentes de ce projet.

A la suite de ces recherches, nous avons envisagé de déterminer différents protocoles expérimentaux nous permettant de déterminer le plus précisément possible les problèmes liés au mélangeur et à la presse. Ce qui nous a alors permis de réaliser différentes expériences à la fois sur le mélangeur et la presse, dans le but d'améliorer la ligne pilote afin qu'elle soit la plus fidèle possible à la ligne industrielle. Par manque de temps, certaines expériences n'ont pas pu être réalisées, cependant nous avons tenté de donner des pistes afin de pouvoir les effectuer par la suite.

D'autre part, nous avons aussi réalisé un modèle 3D d'une nouvelle presse qui a été analysée numériquement par une méthode des éléments finis. Ce qui permet ainsi de fournir des pistes d'amélioration de la presse existante, tant au niveau du profil de densité des panneaux résultants, qu'au niveau de la sécurité. Et nous avons aussi dû nous pencher sérieusement sur les problèmes de sécurité des éléments de la ligne pilote et en raison des vapeurs de monomère. Cependant des prises de mesures (quantité de vapeurs de monomère et de poussières de bois) au bord de la ligne pilote n'ont pas pu être effectuées au cours du projet. Nous avons donc essayé d'apporter des réponses permettant par la suite d'interpréter en termes de sécurité ces mesures afin de choisir au mieux les systèmes de protection à ajouter à la ligne pilote.

# Annexes

## Annexe 1 :

10880-1/4JAU-SS

6083-1/4JAU-SS & 7310-1/4JAU-SS

OPTIONAL -

6/8A 7/7A 8/8A


NOTE: THE SEAL REPAIR KIT CAN ALSO BE USED TO CONVERT PREVIOUS MODELS WITH QUAD RINGS (6/8A) & RETAINER (7/7A) TO MODELS WHICH CONTAIN SPRING LOADED CTTT PACKINGS.

DESCRIPTION:

No. 1/4JAU-SS, NO. 6083-SS,  
No. 6218-SS, No. 7310-SS,  
No. 10880-SS & No. 1/4JAU-SS  
Automatic Air Atomizing Nozzles  
(Shut-Off & Clean-Out)

Part List No.  
PL 1/4JAU-SS  
Rev. No. 6  
SHEET OF

## Annexe 2 :

Date :	15.03.2016	Essai ligne laboratoire.	
Auteur :	TTH		

**But :** Vérifier la bonne pulvérisation du nouveau système d'injection.

**Objectifs :** Tester les nouvelles buses de pulvérisation.  
Constater leur débit, en fonction des différentes pressions (pulvérisation et produit).  
Valider la bonne répartition de produit dans la fibre.

Date de l'essai : 08/03/2016

### **Modification du système de pulvérisation :**

Le système de pulvérisation original, n'étant pas adapté à notre produit à pulvériser ni représentatif de notre ligne de fabrication, il a donc fallu le modifier et le moderniser.

Pour ce faire, nous avons installé un **réservoir de produit sous pression**, ce qui nous permettra de moduler la pression de produit à pulvériser.


Une **commande de levée d'aiguille** afin de contrôler l'ouverture des buses et ainsi le temps de pulvérisation.

Dernière modification sur le circuit pneumatique : **une pression de pulvérisation.**

Les 3 nouveaux paramètres du circuit pneumatique sont **entièrement paramétrable** dans la limite du réseau d'air comprimé (0 à 7 bars).

Les **deux buses ont aussi été remplacées par des pistolets Krautzberger** que l'on utilise dans notre process (pulvérisation d'antidérapant).



Date :	15.03.2016	Essai ligne laboratoire.	
Auteur :	TTH		

**But :** Vérifier la bonne pulvérisation du nouveau système d'injection.

**Objectifs :** Tester les nouvelles buses de pulvérisation.  
Constater leur débit, en fonction des différentes pressions (pulvérisation et produit).  
Valider la bonne répartition de produit dans la fibre.

Date de l'essai : 08/03/2016

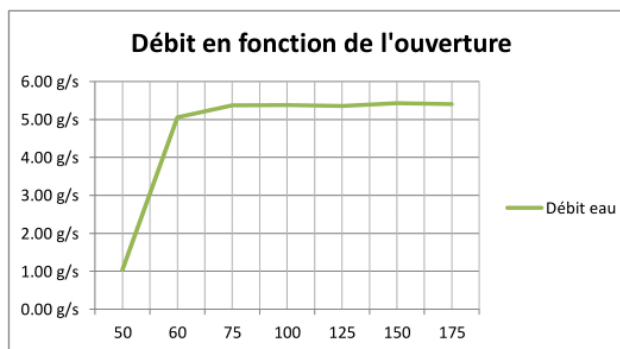
### Mesure de débit et pression :

Les différents essais de débit ont été réalisés avec de l'eau.

#### En fonction ouverture aiguille

temps : 30s pression produit : 3 bars pression commande : 4 bars

Nombre de crans	Buse 1	
	Quantité	Débit eau
50	31.1 g	1.04 g/s
60	151.7 g	5.06 g/s
75	161.3 g	5.38 g/s
100	161.5 g	5.38 g/s
125	160.8 g	5.36 g/s
150	162.9 g	5.43 g/s
175	162.2 g	5.41 g/s

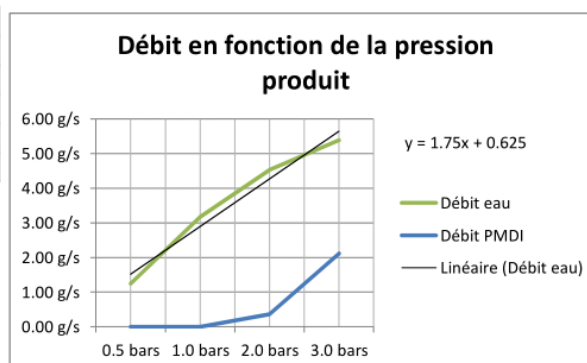


#### En fonction de la pression produit

temps : 30s pression commande : 4 bars

ouverture aiguille : 100 crans

Pression Produit	Buse 1		
	Quantité	Débit eau	Débit PMDI
0.5 bars	37.5 g	1.25 g/s	0.00
1.0 bars	95.1 g	3.17 g/s	0.00
2.0 bars	135.7 g	4.52 g/s	0.37
3.0 bars	161.5 g	5.38 g/s	2.12



Avec du PMDI


Résultat pour 2 buses :

Pproduit :	2 bars
Ouverture :	100 crans
Temps :	30 s
Quantité :	21.9 g
Débit :	0.73 g/s

soit : 0.365 g/s par buse



### Annexe 3 :

Date :	15.03.2016	<b>Essai ligne laboratoire.</b>	
Auteur :	TTH		

**But :** Vérifier la bonne pulvérisation du nouveau système d'injection.

**Objectifs :** Tester les nouvelles buses de pulvérisation.  
Constater leur débit, en fonction des différentes pressions (pulvérisation et produit).  
Valider la bonne répartition de produit dans la fibre.

Date de l'essai : 08/03/2016

#### **Homogénéité mélange liant-fibre :**

Afin de constater la bonne répartition de produit dans les fibres, nous procédons à la pulvérisation de colorant afin de visualiser le produit pulvérisé.

3 niveaux de remplissage du mélangeur seront testés.

Remplissage	Colorant	
1000 g	5%	50 g
700 g		35 g
300 g		15 g

Le premier essai de coloration avec de l'eau et du colorant alimentaire n'a pas donné de résultat, en effet aucune coloration n'est visible.



Avant pulvérisation.



Après pulvérisation.

Le colorant alimentaire a été remplacé par de l'encre liquide d'imprimante.



1000 g



700 g




300 g

On constate que l'ensemble des fibres ont été colorés sur les différents remplissages essayés.

On conseillera un remplissage de 700 -1000g par mélangeur.

Cependant ce test sera à reproduire avec le PMDI coloré, car l'encre étant d'une viscosité comparable à l'eau, l'expérience n'est pas représentative d'une pulvérisation avec le PMDI.

L'encre d'imprimante n'est pas compatible avec le pmdi, il faut donc trouver un colorant puissant compatible avec notre liant.

Date :	15.03.2016	Essai ligne laboratoire.	
Auteur :	TTH		

**But :** Vérifier la bonne pulvérisation du nouveau système d'injection.

**Objectifs :** Tester les nouvelles buses de pulvérisation.  
Constater leur débit, en fonction des différentes pressions (pulvérisation et produit).  
Valider la bonne répartition de produit dans la fibre.

Date de l'essai : 08/03/2016


**Conclusion :**

La modification du système de pulvérisation nous permet de nous rapprocher de notre ligne de production et ainsi de pouvoir mettre sous pression le liant et la pression de pulvérisation.

On se limitera à un remplissage de 700 à 1000 g dans le mélangeur, en dessous de ces valeurs, il n'y a pas assez de fibre et le liant se pulvérise sur les parois. Au dessus, la fibre se compresse et le liant ne peut se mélanger correctement.

La bonne pulvérisation et homogénéité du produit dans les fibres est validée, l'ensemble des fibres est coloré. Cependant, ce test a été réalisé avec de l'encre avec une viscosité proche de l'eau, ce qui n'est pas comparable avec le PMDI. Il faudra donc reproduire cet essai avec du pmdi coloré afin de s'assurer qu'il y a une bonne répartition de produit. L'encre n'est pas compatible avec le PMDI.

## Annexe 4 :

Auteur :	TTH	Ligne laboratoire : Chemin de la fibre dans le mélangeur	
Date :	10.05.2016		

**But :** Vérifier le bon mélangeage de la fibre.

**Objetifs :** S'assurer que la fibre se déplace dans tout le mélangeur.  
La fibre doit se répartir dans tout le mélangeur.

**Protocole de l'essai :**

On place 1000g de fibres dans le mélangeur.  
On introduit à un endroit du mélangeur un lot de fibre colorée.  
On procède au mélangeage, durée 15 secondes.  
Après le mélange, on vérifie la position des fibres colorées dans le mélangeur.

**Déroulement de l'essai :**

Mise en place de la fibre dans le mélangeur + fibre colorées.



Après mélange :



Après 15 secondes de mélange, on constate que les fibres colorées se sont déplacées au sein du mélangeur. On retrouve ses fibres dispersées dans tout le mélangeur.

L'essai a été renouvelé plusieurs fois avec une zone de dépôt de fibres colorées différente, le constat est le même à l'issue du mélangeage : les fibres se retrouvent réparties dans tout le mélangeur.

**Conclusion :**

Ces premiers essais de mélangeage permettent de nous dire que la fibre est bien répartie dans tout le mélangeur.



Auteur :	TTH	Ligne laboratoire : Brassage de la fibre	
Date :	10.05.2016		

**But :** Verifier que toutes les fibres soient brassées par la mélangeur

**Objectifs :** S'assurer que toutes les fibres soient en contact avec le produit injecté.  
S'assurer de la bonne répartition du produit lors du mélangeage.

**Protocole d'essai :**

On place 1000g de fibre fraiche dans le mélangeur.  
On introduit à un endroit au hasard du mélangeur des fibres imbibées d'encre noire.  
On procède au mélange pendant 15 secondes.  
A la suite du mélange, on observe la coloration de la fibre.

**Déroulement de l'essai :**

On introduit les fibres ainsi que l'encre :



On mélange pendant 15 secondes.




On constate que l'encre s'est diffusé à toutes les fibres du mélangeur de façon homogène (même teinte de gris sur l'ensemble).

**Conclusion :**

Cet essai permet de confirmer que le mélangeur autorise le transfert d'un produit à l'ensemble des fibres dans notre mélangeur.

## Annexe 5 :

Auteur :	TTH	Ligne laboratoire : Pulvérisation PMDI colorée	
Date :	10.05.2016		

**But :** Verifier que le pmdi se répartisse sur l'ensemble des fibres dans le mélangeur.

**Objectifs :** Pulvériser du PMDI colorée.  
Constater l'application de la colle sur la fibre.

### Protocole d'essai :

Inserer 1000g de fibre fraiche dans le mélangeur.  
Pulvériser 5 % de colle colorée en suivant la procédure de création de panneau ligne laboratoire.  
Constater la coloration de la fibre par la colle.

### Déroulement de l'essai :

Préparation des 2 PMDI colorés:



A gauche, le colorant vert fournis par Dow. Et à droite le colorant rose fournis par les étudiants EEIGM.

Pulvérisation du pmdi coloré:

On débute par le colorant vert, après pulvérisation on constate un léger teintage de la fibre en vert, mais insuffisant pour une comparaison à l'œil nu.

On poursuit par la pulvérisation du pmdi rose.



Fibre avant mélangeage.



Fibre après mélangeage et pulvérisation PMDI rose

Avec le pmdi coloré en rose, on constate plus facilement le changement de coloration de la fibre.

### Conclusion:

Cet expérience nous a permis de comparer 2 colorants compatible avec notre colle.

Le colorant vert possède un fort pouvoir de coloration du pmdi, mais une fois pulvériser dans le fibre de bois, la teinte verte faiblit et reste peu visible à l'œil.

Le colorant rose teinte également très bien le pmdi, une fois pulvérisé, la fibre de bois se colorie en rose.

La pulvérisation du pmdi coloré en rose permet de constater la bonne répartition de la colle dans la fibre de bois. Avec notre essai on constate que l'ensemble de la fibre de bois contenu dans notre mélangeur s'est coloré en rose sans différence de teinte.



En haut : panneau classique sans colorant

En bas à droite : panneau avec PMDI rose

En bas à gauche : panneau avec PMDI vert

Le colorant rose est de la rhodamine B.

## Annexe 6 :

Tableau 7 : Distance à respecter lorsque le risque est faible (NF EN ISO 13857:2008 paragraphe 4.2.2) [25]

Hauteur <b>a</b> (mm)	Hauteur de la structure de protection <b>b</b> (dimensions en mm)*								
	1 000**	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000	2 200	2 400	2 500
Distance horizontale par rapport à la zone dangereuse <b>c</b> (mm)									
2 400	100	100	100	100	100	100	100	100	
2 200	600	600	500	500	400	350	250		
2 000	1 100	900	700	600	500	350			
1 800	1 100	1 000	900	900	600				
1 600	1 300	1 000	900	900	500				
1 400	1 300	1 000	900	800	100				
1 200	1 400	1 000	900	500					
1 000	1 400	1 000	900	300					
800	1 300	900	600						
600	1 200	500							
400	1 200	300							
200	1 100	200							
0	1 100	200							

\* Aucune interpolation ne doit être faite à partir des valeurs de ces tableaux. On retiendra, dans tous les cas, celle qui entraîne la sécurité la plus grande.

\*\* Les structures de hauteur inférieure à 1 000 mm ne sont pas prises en compte car elles ne limitent pas suffisamment les mouvements.

## Annexe 7 :

Tableau 8 : Appareils filtrants anti-poussières

CONCENTRATION NE DÉPASSANT PAS	APPAREILS CLASSÉS PAR DEGRÉ DE PROTECTION CROISSANTE
4 x VL	demi-masque filtrant à usage unique FFP1
	demi-masque avec filtre P1
	masque complet avec filtre P1
5 x VL	casque ou cagoule à ventilation assistée TH1 P
10 x VL	demi-masque filtrant à usage unique FFP2
	demi-masque avec filtre P2
	masque complet avec filtre P2
	masque complet ou demi-masque à ventilation assistée TM1 P
20 x VL ou 10 x VL	demi-masque filtrant à usage unique FFP3
20 x VL ou 10 x VL	demi-masque avec filtre P3
20 x VL	casque ou cagoule à ventilation assistée TH2 P
	masque complet ou demi-masque à ventilation assistée TM2 P
40 x VL ou 30 x VL	masque complet avec filtre P3
40 x VL	casque ou cagoule à ventilation assistée TH3 P
40 x VL ou 60 x VL	masque complet à ventilation assistée TM3 P

VL = VLCT ou VL 8 h ou concentration limite admissible

En rouge → valeur conseillée INRS

En bleu → FPA issu de l'annexe C de la norme NF EN 529

Attention : la protection apportée par un demi-masque filtrant à usage unique FFP3 est supérieure à celle d'un demi-masque filtrant à usage unique FFP2.

Tableau 9 : Appareils filtrants anti-gaz

CONCENTRATION NE DÉPASSANT PAS	APPAREILS CLASSÉS PAR DEGRÉ DE PROTECTION CROISSANTE
5 x VL	casque ou cagoule à ventilation assistée de classe TH1 et filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
10 x VL	demi-masque filtrant à usage unique avec filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
	demi-masque avec filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
20 x VL	masque ou demi-masque à ventilation assistée de classe TM1 et filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
	casque ou cagoule à ventilation assistée de classe TH2 et filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
	masque ou demi-masque à ventilation assistée de classe TM2 et filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
40 x VL	masque complet et filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
40 x VL ou 60 x VL	casque ou cagoule à ventilation assistée de classe TH3 et filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3
	masque complet à ventilation assistée de classe TM3 et filtres anti-gaz de classe 1, 2 ou 3




VL = VLCT ou VL 8 h ou concentration limite admissible

En rouge = valeur conseillée INRS

En bleu = FPA issu de l'annexe C de la norme NF EN 529

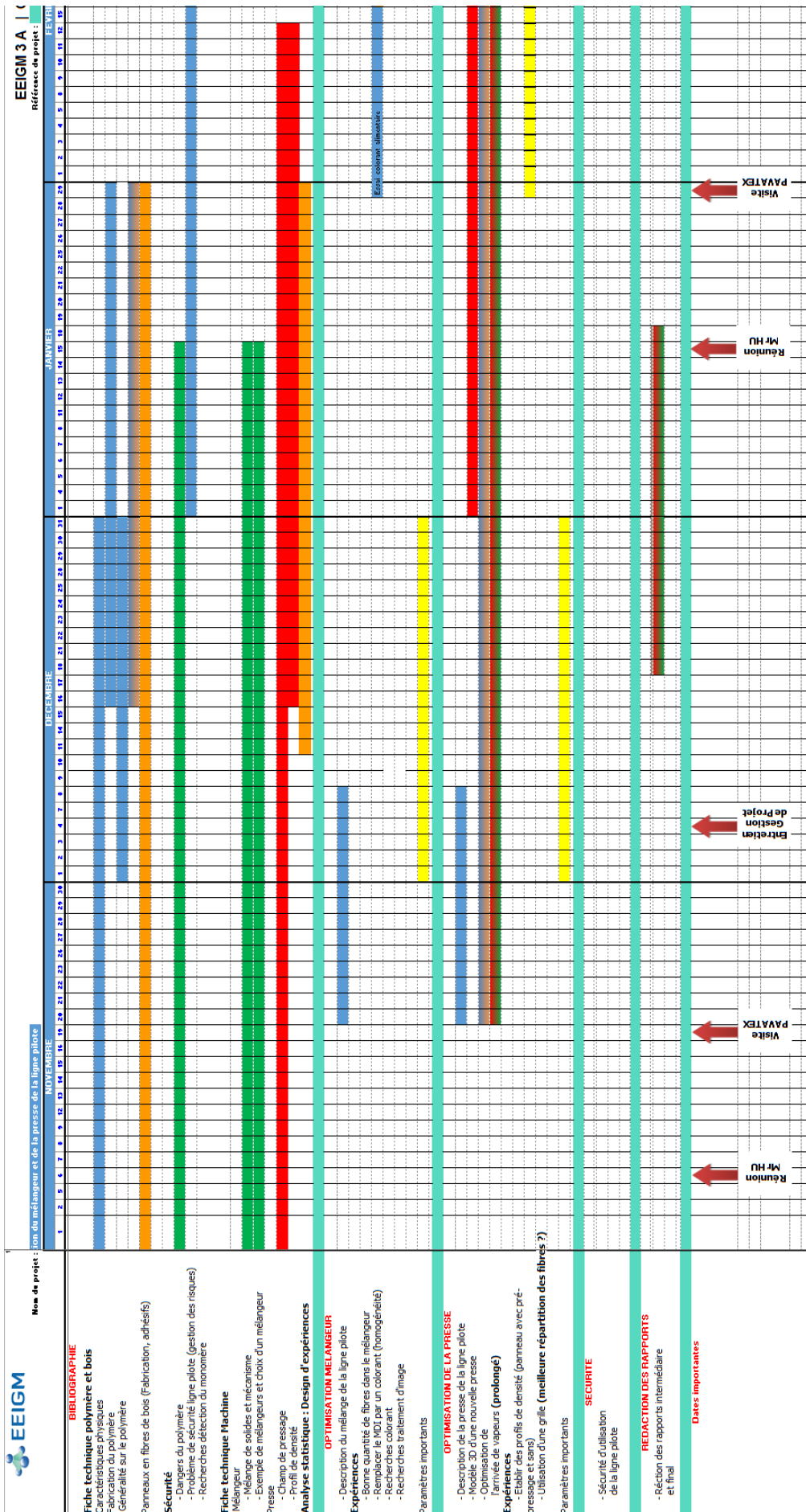


## Annexe 8 :

	Ayoub El Ghani
	Alanjandro Simó
	Ayoub Bouhaddioui

- Pauline Levérone
- Thierry Thomas (PAVATEX)
- ECHEANCE - DATE CIBLE

 JALON





## Annexe 9 :

# Note de cadrage

**PROJET** : Optimisation du mélangeur et de la presse de la ligne pilote (Pavatex)

### **Contexte** :

Le matériel (mélangeur et presse) utilisé actuellement par l'entreprise étant relativement précaire, le but du projet est d'optimiser ces deux éléments. Les enjeux de ce projet seraient donc d'améliorer :

- le mélangeur (mélange homogène ou non, et comment l'améliorer)
- l'homogénéisation du dépôt de fibres de bois dans la presse
- le système de pressage (modèle de la presse en mauvais état).

### **Données d'entrée** :

Ligne pilote défaillante : le mélangeur actuel est vieillissant et dangereux, le mécanisme de la presse présente des risques réels de blessure, le monomère présente des risques en raison de sa toxicité, le pressage ne se fait pas de manière homogène.

### **Produit du projet** :

Le produit de ce projet est la réalisation d'un rapport bibliographique et expérimental visant à apporter des pistes d'idées, ou des solutions dans le but d'optimiser le mélangeur et la presse de la ligne pilote, tout en limitant les risques qui y sont associés. Ce rapport devra aussi contenir un chapitre sur la gestion de projet.

**Objectifs de performances, de coûts, de délais** : Le projet doit être finalisé pour le **13 juin 2016**.

### **Acteurs du projet** :

Nous sommes 4 étudiants à l'EEIGM à Nancy, *SIMÓ VESPERINAS Alejandro, ELGHANI Ayoub, LEVERONE Pauline et BOUHADDIOUI Ayoub*. Notre tuteur académique est l'enseignant chercheur, *HU Guo-Hua*. Notre tuteur industriel est l'ingénieur procédé *Thierry THOMAS*.

### **Contraintes** :

Afin de débiter le projet, il nous est nécessaire d'avoir plus de précisions sur les enjeux exactes.

Nous avons une contrainte de déplacement, nous ne pouvons pas nous déplacer pour rendre visite à notre tuteur sans être emmené par un professeur. Il faudrait demander à l'école d'avoir le droit d'utiliser nos propres voitures.

### **Risques** :

Le sujet étant très complet, nous risquons ne pas avoir le temps de traiter avec la même précision tous les points abordés.

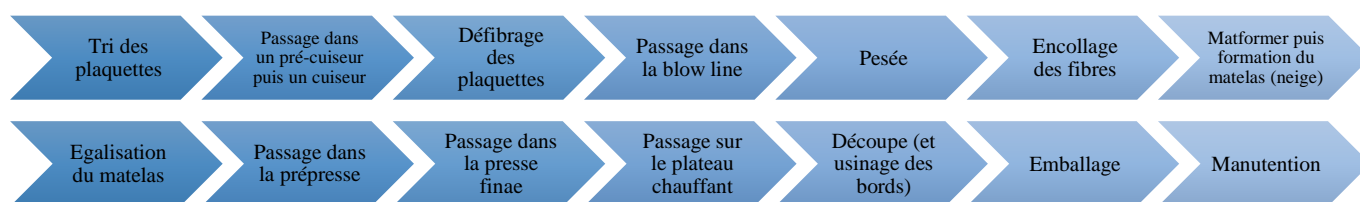
## Annexe 10 :

Première visite chez PAVATEX 19/11/2015

# Visite de l'entreprise PAVATEX

L'entreprise PAVATEX, pour diminuer sa consommation d'eau et d'énergie récupère l'électricité, l'eau, et les vapeurs d'eau produites par la papeterie adjacente : Norske Skog. De plus, pour être en accord avec sa valeur de durabilité, le bois (résineux), matière première pour la production des panneaux isolants, provient d'exploitations forestières locales (maximum 150km).

## Procédé de fabrication des panneaux isolants :



→ Les plaquettes de bois sont en premier lieu triées. Le passage dans des tamis permet de retirer les poussières, les plaquettes trop grandes ou bien les intrus (métaux, plastiques).  
→ Elles passent ensuite dans deux cuiseurs. Un pré-cuiseur, sans pression, qui permet de retirer une première partie de l'eau contenue dans les plaquettes. Puis dans un cuiseur qui permet de les réchauffer et ramollir.

→ Les plaquettes passent alors dans le défibreur, entre deux cercles (un rotor et un stator) qui vont jouer un rôle de centrifugeuse. On récupérera alors des fibres de bois humides.

→ Ces fibres vont alors passer dans la «blow line» afin d'être séchées. Les vapeurs d'eau qui seront récupérées seront filtrées dans un filtre électrostatique (l'eau est vaporisée et les poussières retombent par gravité) afin de ne pas rejeter de poussières de bois dans l'air.

→ Après avoir été séchées, les fibres sont pesées en continue sur un tapis roulant, la balance permet de mesurer le débit de fibres ce qui permettra de déterminer la quantité de colle à ajouter (entre 4-6% du débit de fibres).

→ Ce flux de fibres est alors séparé en deux afin d'être envoyé dans deux tours d'encollage. La séparation du flux de fibre permet de réduire les problèmes de tuyaux bouchés. La capacité de production de ces deux tours d'encollage est de 8t/h. Lors de notre visite elles étaient à 7t/h, soit une capacité de 3,5t/h par tour.

→ Les fibres encollées sont stockées dans le «matformer», avant d'être dispersées en neige sur le tapis afin de former le matelas. Un rouleau permet de l'égaliser.

→ Ce matelas passe alors dans la prépresse afin d'enlever un maximum d'air et donner la bonne orientation des fibres. Lors de ce passage, les bords du matelas ne sont pas correctement pressés que le reste, ils sont alors découpés, et comme la colle n'est pas encore polymérisée, ces parties sont recyclées.

→ Le passage dans la presse finale (80-100bars) est accompagné de vapeur d'eau (~100°C) injectée par le dessous qui permet d'activer la colle et de polymériser le PMDI.

→ Le matelas passe alors sur un plateau chauffant (~120°C) afin de renforcer la polymérisation.

→ Le matelas est ensuite refroidit avant d'être découpés en «master board» (plaques de grandes dimensions) par une scie diagonale qui découpe au fur et à mesure que le matelas avance. Les bords sont aussi découpés de manière à ce qu'ils soient bien droits.

→ Ces grandes plaques sont alors découpées dans la largeur et la longueur afin de format les panneaux isolants finaux. Les bords des panneaux peuvent être laissés droits, ou bien usinés



(rainures et languettes). Ils sont alors manutentionnés et emballés afin d'être protégés lors de l'expédition.

#### Qualité :

Lorsque la première chaîne est lancée, le premier panneau n'est pas conservé, car ce dernier n'est pas correctement polymérisé. En effet, lors du pressage, la vapeur d'eau ne se déclenche que lorsque le panneau a déjà bien avancé dans la presse, ce qui permet d'éviter le danger d'avoir de la vapeur d'eau dans toute l'usine.

Des tests de qualité sont réalisés toutes les 2h, de manière à pouvoir intervenir rapidement dès le moindre défaut sur les panneaux. Cela consiste en des tests de qualité des dimensions en sortie, de densité, de flexion, de compression et d'absorption d'eau sur des morceaux de 200x200mm de panneaux.

#### Informations complémentaires :

La presse de la ligne permet d'atteindre des densités allant de  $100-110\text{kg.m}^{-3}$  à  $200\text{kg.m}^{-3}$ , cependant au-dessus d'une densité de  $150\text{kg.m}^{-3}$  il y a des risques de casser la machine.

La production de l'entreprise fonctionne sur des commandes allant de 20-30 palettes à 900-1000 palettes. La production tourne 24h/24 et 7j/7.

Pour une meilleure flexion, on aura des panneaux moins denses donc on ajoutera plus de colle. Pour un panneau qui devra moins absorber l'eau on ajoutera plus de paraffine.

→ **La proportion de colle varie donc en fonction de la commande.**

La teneur en humidité en sortie du séchoir est d'environ 7-8%.

Lors d'une panne obligeant l'arrêt de la chaîne de production, il est nécessaire de laver la colle des fibres avec un solvant (pas de l'eau : réactif).

#### Ligne pilote :

Mélangeur : fibres séchées, pesées, sont mises dans le mélangeur. Celui-ci est fermé et on injecte la colle avec des buses (2 trous sont prévus pour les buses). Le mélangeur est plutôt prévu pour des **fibres humides**. La colle injectée par les buses arrive par gravité, plus sous pression (problème mécanique qui devrait être réglé). Après le mélange on ouvre par le dessous et on récupère les fibres encollées.

Le volume est-il bon ? Plus ou moins de fibres ? Bon mélangeur ? Bonne forme ? Combien de temps ?

Presse : Les fibres sont disposées entre deux bandes, puis une plaque qui servira de presse est posée (cela fait une sorte de prépresse). Un vérin avec un seul point de presse au centre permet de presser (problème d'inclinaison possible, donc pas homogène en épaisseur). La vapeur d'eau arrive sous pression (2.8bar) par le côté et traverse un tube troué.

Durée optimale ? Couper la vapeur pour faire l'étape de maintien en température ?

Sécurité : on ne doit pas pouvoir se faire mal en déplaçant les différentes plaques. Contour de la pièce cassé.

## Réunion 29/01/2016 chez Pavatex

### **I. Mélangeur**

Afin de repérer si la répartition de la colle se fait de manière homogène, des pistes d'expérimentations ont été proposées :

- **remplacer le MDI par de l'eau colorée**, il est alors possible de faire des photographies et de remonter à la répartition par des **analyses d'images**. Il peut aussi être possible, après cette expérience de presser le mélange (sans MDI), afin de voir si le potentiel problème d'homogénéité peut être compensé par l'étape de pressage.
- un autre moyen que le contrôle visuel, serait de mouiller les fibres avec ce mélange coloré, puis de les peser mouillées, de les sécher, et enfin de **calculer le % d'eau**. Cependant, il sera peut être **compliqué** de voir des différences de % d'eau en fonction des zones, car l'ajout d'eau est très minime par rapport à la quantité de fibres (5%).
- afin de déterminer la **quantité idéale de fibres** à mettre dans le mélangeur il faudrait ré-effectuer l'expérience précédente en modifiant la masse de fibres. Les dimensions du mélangeur ont donc été prises : L=63cm, r=25cm, et l=49cm.

Pour le colorant, l'idée du **colorant alimentaire** a été proposée. **Cependant, la quantité d'eau est trop faible pour que le colorant soit efficace sur les fibres.**

### **II. Sécurité**

Le problème de sécurité au niveau de la presse en raison des vapeurs de MDI a été abordé, comme par exemple l'idée des **badges** détectant une présence excessive de **MDI** dans l'air (<http://www.afcintl.com/safeair-direct-read-colorimetric-badges-from-morphix-technologies-1.aspx>) ou bien la nécessité d'ajouter une hotte. Cette seconde idée sera ou non mise en place en fonction des résultats de mesures de la teneur de MDI dans l'air aux alentours de la ligne pilote.

De plus, il se pose aussi le problème de sécurité au niveau de la **fermeture du mélangeur**, des normes sont à rechercher.

### **III. Presse**

Une première idée a été **d'établir un profil de densité** sur des panneaux issus de la ligne pilote :

- sur un panneau réalisé avec la méthode qui a toujours été utilisée (sans prépressage)
- et un second, en respectant l'étape de prépressage à la manière de la ligne industrielle.

En effet, le but de la ligne pilote est de reproduire au maximum la ligne industrielle, ainsi il serait préférable d'effectuer une phase de prépressage (favorise la bonne homogénéité sur la ligne industrielle), puis un temps de repos, et enfin une phase de pressage avec la vapeur, en conservant la même force pour les 2 phases.

Les précédentes expérimentations de ce type (méthode sans prépressage) donnaient des résultats avec des **écarts de l'ordre de 30% en densité** entre le dessus (+ dense) et le dessous (- dense) du panneau.

De plus, afin **d'améliorer la répartition** du mélange fibres+MDI lorsqu'il est étalé dans la presse, nous avons pensé à **ajouter une grille**. Ainsi une même masse de mélange serait mis dans chaque carreau de la grille.

## Bibliographie

- [1] PAVATEX SA, «PAVATEX SA,» [En ligne]. Available: <http://www.pavatex.fr>. [Accès le 2015-2016].
- [2] E. 1. M. 2. Norme Française, Panneaux de fibres de bois - Définition, classification et symboles, 2009.
- [3] E. Koller, Dictionnaire encyclopédique des sciences des matériaux, Dunod, 2008.
- [4] D. Bolmont et M. Fouchard, Le guide du bois et ses dérivés - L'arbre et la forêt, les propriétés, le séchage, la préservation, Afnor editions, 2010.
- [5] G. D. Taylor, Materials in Construction: An Introduction, Pearson Education, 2000.
- [6] A. Gardziella, L. Pilato et A. Knop, Phenolic Resins: Chemistry, Applications, Standardization, Safety and Ecology, Springer, 2000.
- [7] I. Boustead, «Eco-Profiles of The European Plastics Industry. Polyurethane rigid foam.,» Plastics Europe, 2005.
- [8] G. Marlair, «MDI Di-isocyanate de diphenyl méthan,» 2002.
- [9] S. Wieland, «Utilisation d'adhésifs respectueux de l'environnement pour la fabrication de panneaux dérivés du bois à faible émission de formaldéhyde - caractérisation des paramètres de pressage - évaluation des propriétés des panneaux,» 2007.
- [10] L. L. André, «Mélange de solide,» *Techniques de l'ingénieur*, n° %1A5940, 10 mai 1983.
- [11] B. Henri, «Mélange et homogénéisation des solides divisés,» *Techniques de l'ingénieur*, n° %1J3397, 10 décembre 2002.
- [12] M. V. Bastias, «Modelling of Solid Wood Drying and Hot Pressing of Medium Density Fibreboard,» 2006. [En ligne]. Available: <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23403/ch02.html#d0e174>. [Accès le Février 2016].
- [13] American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH®), «ACGHI,» 2016. [En ligne]. Available: <http://www.acgih.org/>. [Accès le Décembre 2015].
- [14] Occupational Safety & Health Administration, «United States Department of Labor,» [En ligne]. Available: <https://www.osha.gov/>.
- [15] PAVATEX, *Fiche de données de sécurité PAVACOLL 310/600*, 2015.
- [16] DOW France SAS, *Fiche de données de sécurité simplifiée VORAMER*, 2015.
- [17] American Chemistry Council, «American Chemistry Council,» Septembre 2012. [En ligne]. Available: <https://polyurethane.americanchemistry.com/resources-and-document->

- library/11364.pdf. [Accès le Décembre 2015].
- [18] CSST, «Sécurité des machines,» 2008. [En ligne]. Available: [http://www.csst.qc.ca/publications/200/Documents/DC200\\_16002\\_1web.pdf](http://www.csst.qc.ca/publications/200/Documents/DC200_16002_1web.pdf).
  - [19] D. C. Montgomery et G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Wiley, Éd., 2010.
  - [20] C. Ammarcha, «Mélange des poudres en continu : modèles dynamiques et caractérisation des mélanges en ligne,» 2010.
  - [21] Sigma-Aldrich, «Rhodamine B base Sigma-Aldrich,» [En ligne]. Available: [http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/234141?lang=fr&region=FR&gclid=CjwKEAjwt6\\_q5BRCOp-Hj-IfHwncSJABMtDaiUUIRWnyT0YvgtyAHy2NCH3yQO\\_PhRhmQAOAtUxIe8RoCk3\\_w\\_wcB](http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/234141?lang=fr&region=FR&gclid=CjwKEAjwt6_q5BRCOp-Hj-IfHwncSJABMtDaiUUIRWnyT0YvgtyAHy2NCH3yQO_PhRhmQAOAtUxIe8RoCk3_w_wcB). [Accès le mai 2015].
  - [22] IRH Environnement, «Groupe IRH Environnement : l'eau, l'air, la terre, le développement durable,» [En ligne]. Available: <http://www.groupeirhenvironnement.com/fr>.
  - [23] T. Jones, W. Göpel, M. Kleitz, I. Lundström et T. Seiyama, *Sensors: Chemical and Biochemical Sensors*, 2008.
  - [24] INRS Santé et Sécurité au travail, «Conception et utilisation des équipements de travail,» 2016.
  - [25] J.-C. Blaise, B. Daille-Lefèvre, H. Lupin, J. Marsot et G. Wéltitz, «Sécurité des équipements de travail : Prévention des risques mécaniques,» 2013.
  - [26] INRS Santé et Sécurité au travail, «Poussières de bois,» 15 12 2014. [En ligne]. Available: <http://www.inrs.fr/risques/poussieres-bois/ce-qu-il-faut-retenir.html>. [Accès le 2016].
  - [27] INRS Santé et Sécurité au travail, «Fiche DEMETER : 4,4'-Diisocyanate de diphenylméthane (4,4'-MDI),» 2010.
  - [28] INRS Santé et Sécurité au travail, «Les appareils de protection respiratoire : Choix et utilisation,» 2011.
  - [29] «Methylene diphenyl diisocyanate,» 2016. [En ligne]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene\\_diphenyl\\_diisocyanate](https://en.wikipedia.org/wiki/Methylene_diphenyl_diisocyanate).
  - [30] «Melamine resin,» 2015. [En ligne]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Melamine\\_resin](https://en.wikipedia.org/wiki/Melamine_resin).
  - [31] «Phenol formaldehyde resin,» 2016. [En ligne]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Phenol\\_formaldehyde\\_resin](https://en.wikipedia.org/wiki/Phenol_formaldehyde_resin).
  - [32] «Polymeres Diphenylmethandiisocyanat,» 2014. [En ligne]. Available:

[https://de.wikipedia.org/wiki/Polymere\\_Diphenylmethandiisocyanat](https://de.wikipedia.org/wiki/Polymere_Diphenylmethandiisocyanat).

- [33] J. A. L. Michael Salzingera, *Reaction network and mechanism of the synthesis of methylenedianiline over dealuminated Y-type zeolites*, 2011.